

Sivukuormitettujen pylväsperustusten suunnitteluohje

Pohjarakenteiden suunnitteluohjeet



Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje

Pohjarakenteiden suunnitteluohjeet

Liikenneviraston ohjeita 32/2016

Kannen kuva: Panu Tolla

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-663X

ISSN 1798-6648

ISBN 978-952-317-334-7

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Tekniikka ja ympäristö -osasto

Vastaanottaja
Liikennevirasto, ELY-keskukset / liikenne-
ja infrastruktuuri

Säädöspäätös
Maantielaki, Ratalaki

Korvaa: Meluesteperustukset
Muuttaa: Tien melusteiden suunnittelu, Rautateiden melusteet, Sivu-
kuormitetut pilariperustukset

Kohdistuvuus
Liikenneväylien suunnittelu ja toteutus

Voimassa
1.1.2017 alkaen toistaiseksi

Asiasanat
Pylväät, perustukset, melusteet, portaalit, geotekniikka, suunnittelu, suunnitteluohjeet

Sivukuormitettujen pylväspäätösten suunnitteluohje

Liikenneviraston ohjeita 32/2016

Tätä ohjetta noudatetaan teiden ja ratojen melusteiden, valaisinmästöjen ja portaalien sekä sähköradan kannatinpylväiden ja -portaalien ja ratojen opastimien pästämisen suunnittelussa. Ohje on laadittu erityisesti geoteknistä suunnittelua varten. Rakennetekninen suunnittelun osalta on esitetty ainoastaan täsmennykset Liikenneviraston teräs- ja betonirakenteita mitoitusta koskeviin ohjeisiin, jotka pästävät Eurokoodeihin.

Ohje ei koske valaisinpylväitä, riista-aitoja, vakiokokoisia liikennemerkkejä ja opasteita ja muita näihin verrattavia pieniä varusteita.

Sähköradan kannatinpylväiden ja portaalien suunnitteluun tämä on uusi Liikenneviraston ohje.

Ohje kumoaa: Tielaitos. Meluesteperustukset, TIEL 2140007-94

Tämä ohje korvaa pästösten suunnittelua koskevat osat seuraavissa ohjeissa:

- Liikennevirasto. Tien melusteiden suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita LO 21/2015
- Ratahallintokeskus. Rautateiden melusteet, Ratahallintokeskuksen julkaisu B 11/2004
- Tiehallinto. Sivukuormitetut pilariperustukset, TIEH 2100006-01

LISÄTIETOJA
Panu Tolla
Liikennevirasto
puh. 0295 34 3501

1.12.2016

LIVI/7462/06.04.01/2016

Edellä mainituissa ohjeissa esitetyt vaatimukset koskien perustusten sallittuja siirtymiä ja painumia jäävät kuitenkin voimaan. Tässä ohjeessa on näiltä osin esitetty viittaukset ko. ohjeisiin.

Tekninen johtaja Markku Nummelin

Geoasiantuntija Panu Tolla

*Tämä ohje hyväksytään sähköisellä allekirjoituksella.
Merkintä sähköisestä allekirjoituksesta on viimeisellä sivulla.*

Ohje saatavissa

LIIKENNEVIRASTON NETTISIVUILTA OSOITTEESTA
www.liikennevirasto.fi/ohjeluettelo

Esipuhe

Liikenneviraston hankkeissa pylväasperustuksia tarvitaan tyypillisesti sähkörata-pylväissä (radat), liikenneopasteiden ja ohjauslaitteiden merkkien pylväissä ja portaaleissa sekä meluesteiden perustamisessa. Sivusuuntaisten kuormien osuus on näissä perustuksista huomattavan suuri. Perustukset sijoittuvat usein penger- tai leikkausluiskan alueelle. Tämä ohje on laadittu, koska edellä mainitut tekijät vaikeuttavat yleisten mitoitusohjeiden soveltamista ko. perustuksiin.

Ohjeen laatimista varten Pöyry Finland Oy teki Liikenneviraston toimeksiannosta taustaselvityksen, jossa mm. analysoitiin aiemmin tehdyt perusten kuormituskokeet ja mallinnettiin erilasten perusten toimintaa numeerisesti. Lisäksi työssä on hyödynnetty Mauri Kulmanin lisensiaattitutkimusta (TTY). Perusten routamitoitusta varten Antti Nurmikolu laati Liikenneviraston toimeksiannosta selvityksen, jonka perusteella routasuojauksia koskevat ohjeet on laadittu.

Ohjeen on laatinut Liikenneviraston toimeksiannosta Pöyry Finland Oy. Työryhmään kuuluivat Sakari Lotvonen ja Simo Luukkonen Pöyry Finland Oy:stä. Antti Nurmikolu osallistui routamitoitusosan laadintaan. Työtä ohjasivat Panu Tolla, Sami Noponen ja Veli-Matti Uotinen Liikennevirastosta.

Helsingissä joulukuussa 2016

Liikennevirasto
Tekniikka ja ympäristö -osasto

Sisällysluettelo

1	SOVELTAMISALUE JA LIITTYMINEN MUIHIN OHJEISIIN	8
1.1	Ohjeen soveltamisalue	8
1.2	Suunnittelussa sovellettavat ohjeet.....	8
2	SUUNNITTELUPERUSTEET	10
2.1	Suunnittelun lähtötiedot	10
2.1.1	Yleistä	10
2.1.2	Pohjatutkimukset	10
2.1.3	Maakerrosten lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet	11
2.2	Mitoitusperusteet	13
2.2.1	Geotekninen luokka ja seuraamusluokka	13
2.2.2	Rakenteen käyttöikä	13
2.3	Tekniset vaatimukset	13
2.3.1	Mitoituksen raja-arvoja	13
2.3.2	Laatuvaatimukset	15
2.3.3	Harukset ja maadoitus.....	16
3	KUORMAT	18
3.1	Yleistä	18
3.2	Perustukselle tulevat kuormat.....	18
3.2.1	Omapaino.....	18
3.2.2	Maanpaine	18
3.2.3	Negatiivinen vaippahankaus	21
3.2.4	Liikennekuormat	21
3.2.5	Ylärakenteilta tulevat kuormat	21
3.3	Kuormien yhdistely ja osavarmuudet	22
3.3.1	Yleistä	22
3.3.2	Murtorajatila.....	22
3.3.3	Käyttörajatila.....	23
4	PERUSTUSTYYPIT JA PERUSTAMISOLOSUHTEET	24
4.1	Perustamistavat	24
4.2	Perustamisolosuhteet	24
5	MAANVARAINEN ANTURAPERUSTUS.....	27
5.1	Yleistä	27
5.2	Murtorajatilamitoitus.....	27
5.2.1	Yleistä	27
5.2.2	Kantokestävyys	27
5.2.3	Maanpinnan kaltevuuden vaikutus kantokestävyyteen.....	27
5.2.4	Liukuminen	29
5.3	Käyttörajatilamitoitus.....	29
5.3.1	Yleistä	29
5.3.2	Painumat	29
5.3.3	Kiertymät.....	29

Sivukuormitettujen pylväsperustusten suunnitteluohje

6	KALLIONVARAINEN PERUSTUS	32
6.1	Yleistä	32
6.2	Kallionvaraisen perustuksen mitoitus	32
6.2.1	Kantokestävyys	32
6.2.2	Kaatuminen	32
6.2.3	Liukuminen	32
6.3	Tartuntateräksiset ja ankkurit	33
6.3.1	Tartuntojen ja ankkurien käyttö	33
6.3.2	Tartuntateräksiset	33
6.3.3	Ankkurit	33
7	PAALUPERUSTUKSET	34
7.1	Yleistä	34
7.2	Murtorajatilamitoitus	35
7.2.1	Yleistä	35
7.2.2	Sivukuormitetun paaluperustuksen murtorajatilamitoitus alustalukumenetelmällä	35
7.2.3	Murtorajatilatarkastelu käsin laskemalla	36
7.3	Käyttöraajatilamitoitus	38
7.4	Alustalukumenetelmä	38
7.4.1	Alustalukujen määrittäminen	38
7.4.2	Luiskan vaikutus alustalukuihin ja paalun sivuvastukseen	39
7.4.3	Syklisen kuorman vaikutus alustalukuihin	41
7.5	Paaluryhmä	42
8	KOKEELLINEN MITOITUS	43
9	ROUTASUOJAUS	45
9.1	Maanvarainen antura- tai pilariperustus	45
9.1.1	Routasyvyyden määrittäminen ja mitoittava pakkasmäärä	45
9.1.2	Maanvaraisen anturallisen perustuksen routasuojaus	47
9.2	Paaluperustuksen routasuojaus	48
9.3	Liittyvien rakenteiden routasuojaus	48
10	SUUNNITELMAN SISÄLTÖ	49
10.1	Geotekninen suunnitteluraportti	49
10.1.1	Pohjaolosuhdeselvitykset ja perustamistapalausunto	49
10.1.2	Laskelmaselostus	49
10.2	Piirustukset	49
10.3	Laatuvaatimukset ja työselostukset	51
	KIRJALLISUUSLUETTELO	52
	LIITTEET	
Liite 1	Laskuesimerkki 1. Maanvarainen anturallinen ratapylväsperustus	
Liite 2	Laskuesimerkki 2. Meluesteen putkipaaluperustus	

1 Soveltamisalue ja liittyminen muihin ohjeisiin

1.1 Ohjeen soveltamisalue

Tämä suunnitteluohje on laadittu noudatettavaksi kaikissa Liikenneviraston hankkeissa suunniteltaessa ja rakennettaessa sivukuormitettuja pylväsperustusrakenteita. Ohje käsittää rakenteiden geoteknisen suunnittelun ja rakenneteknisen mitoituksen osalta antaa pylväsperustuksia koskevia lisäohjeita.

Sivukuormitetuille pylväsperustoille on ominaista vaakasuuntaisen ja momentti-kuormituksen suhteellisen suuri osuus pystysuuntaiseen kuormitukseen verrattuna. Voimakkaasti sivukuormitettuja rakenteita esiintyy mm. seuraavissa tapauksissa:

- rataverkon kannatin-, opastin- ja valaisinpylväät
- meluesteet
- portaalit
- valaisinmastot

Tätä ohjetta ei noudateta raskaampien rakenteiden perustusten, kuten siltojen perustusten suunnittelussa. Ohje myöskään ei koske valaisinpylväitä, riista-aitoja, vakiokokoisia liikennemerkkejä ja opasteita ja muita näihin verrattavia pieniä varusteita.

Ohje on laadittu erityisesti geoteknistä suunnittelua varten. Rakennetekninen suunnittelun osalta on esitetty ainoastaan täsmennykset Liikenneviraston teräs- ja betonirakenteita mitoitusta koskeviin ohjeisiin, jotka perustuvat Eurokoodeihin. Vaatimukset koskien perustusten sallittuja siirtymiä ja painumia on esitetty viittauksina ko. rakennetta koskeviin ohjeisiin.

1.2 Suunnittelussa sovellettavat ohjeet

Sivukuormitettujen pylväsperustusten suunnittelussa sovellettavien määräysten ja ohjeiden pätemisjärjestys on seuraava:

1. Liikenteen turvallisuusviraston (TraFi) määräykset
2. Yhteentoimivuuden tekniset eritelmät YTE
3. Liikenneviraston antamat hankkeen suunnitteluperusteet
4. Eurokoodit ja niiden kansalliset liitteet (alla oleellimmat lueteltuna):
 - SFS-EN 1990 Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet
 - SFS-EN 1991 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat
 - SFS-EN 1992 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu
 - SFS-EN 1993 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu
 - SFS-EN 1997 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu
5. Liikenneviraston Eurokoodien soveltamisohjeet (NCCI-sarja) ja tämä ohje
6. Liikenneviraston ohjeet (alla lueteltuina tämän ohjeen suhteen oleellimmat):
 - LO 20/2013 Liikennemerkkien rakenne ja pystytys
 - LO 21/2013 Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 5, Sähköistetty rata
 - LO 21/2015 Tien meluesteiden suunnittelu
 - RHK B11/2004 Rautateiden meluesteet

7. Muut ohjeet ja oppaat (alla oleelliset lueteltuina):
- UIC 779-1 Effect of the slipstream of passing trains on structures adjacent to the track
 - Rakennustuotteiden CE-merkintä (Liikenneviraston opas 2015)

2 Suunnitteluperusteet

2.1 Suunnittelun lähtötiedot

2.1.1 Yleistä

Perustuksen suunnittelua varten suunnittelijan on hankittava tai hänelle on toimitettava jäljempänä esitetyt lähtötiedot. Tarvittavien lähtötietojen määrä riippuu perustettavasta rakenteesta. Yleisesti kaikkia sivukuormitettuja pylväsperustuksia koskevat seuraavat lähtötietovaatimukset.

Pylväsperustusten suunnittelua varten tarvitaan lähtötietoina kutakin rakennetta koskien mm. seuraavat tiedot:

- tiedot perustettavista rakenteista (mm. perustettava pylvästyyppi, perustuksen sijainti, yläpään korkeusasema, ylärakenteelta perustuksille tulevat kuormat)
- maanpinnan korkeusasema ja muoto
- penkereen korkeus ja pengerluiskan kaltevuus, mikäli perustus sijaitsee pengerluiskassa
- pohjaolosuhdetiedot ja alueelta tehdyt pohjatutkimukset sekä pohjatutkimustyöraportti
- perustuksen rakentamiseen vaikuttavat muut rakennustyöt, kuten olemassa olevien poistettavien, siirrettävien tai säilytettävien maanalaisten johto-, kaapeli- ja putkirakenteiden sekä muiden rakenteiden sijainti ja perustamistapa
- maaperän ympäristöolosuhteiden vaikutukset materiaaleihin (mm. aggressiivisuus, happamuus, korroosioalttius)
- rakennetun ympäristön vaikutukset materiaaleihin (mm. sähköradoilla maadoitustarve sekä tieympäristössä tiesuolaus)

2.1.2 Pohjatutkimukset

Rakennushankkeeseen ryhtyessä on tehtävä riittävän seikkaperäiset pohjatutkimukset eri suunnitteluvaiheita vastaavasti perustamistavan valintaa ja perustusrakenteiden sekä muiden pohjarakennustöiden suunnittelua ja rakentamista varten.

Rakennuspaikan geotekniset maakerrokset, niiden ominaisuudet ja tiiveys sekä tarvittaessa kallion ominaisuudet on aina selvitettävä suunnitteluvaiheen ja suunnittelutehtävän edellyttämällä riittävällä tarkkuudella sekä riittävän luotettavilla menetelmillä huomioiden Eurokoodi 7:n osissa 1 ja 2 sekä osan 1 kansallisessa liitteessä (LVM-liite) että Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeessa NCCI7 sekä tässä ohjeessa esitetyt vaatimukset.

Maakerrosten geoteknisten ominaisuuksien määrittäminen perustuu pohjatutkimuksiin, joiden toteutuksessa noudatetaan Liikenneviraston ohjetta *Geotekniset tutkimukset ja mittaukset*. Maan ja maamateriaalien routivuus määritetään Liikenneviraston ohjetta *Tien geotekninen suunnittelu* noudattaen.

Maakerrosten ominaisuuksien lisäksi täytyy olla selvitettyinä eri perustustyyppien rakentamiseen vaikuttavat asiat. Tällaisia asioita ovat mm. kallionpinnan tason sijainti ja maaperän kivisyys, jotka vaikuttavat esimerkiksi lyötävien putkipaaluperustusten käyttöön. Pehmeiden maakerrosten osalta maan kokoonpuristuvuusominaisuudet sekä mahdollisen negatiivisen vaippahankauksen esiintyminen täytyy selvittää.

Pylväasperustuksia suunnitellaan usein alueille, josta on tehtynä aiemmin pohjatutkimuksia. Näiden tehtyjen tutkimusten lisäksi tehtävien lisätutkimusten tarve täytyy tarkastella hanke- ja rakennekohtaisesti. Esimerkiksi melusteiden perustuksia voidaan suunnitella kauemmaksikin tiestä, joten vaihtelevissa pohjaolosuhteissa eivät pelkät ajoratojen tai tiepenkereiden alueelta tehdyt pohjatutkimukset välttämättä anna riittävää tietoa perustamistavan valintaan. Tehdyistä pohjatutkimuksista täytyy esittää lähtötietona pohjatutkimusten työraportti.

2.1.3 Maakerrosten lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

2.1.3.1 Luonnonmaakerrokset

Luonnonmaakerrosten geotekniset ominaisuudet sekä lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet määritetään ohjeen *Tien geotekninen suunnittelu* liitteen 1 mukaisesti.

Hienorakeisilla mailla maan leikkauslujuus määritetään siipikairauksilla tai laboratoriokeilla.

2.1.3.2 Ratapenger

Tässä ohjeessa ratapenkereitä käsitellään joko uusina tai vanhoina penkereinä. Ratapenger on lähtökohtaisesti uusi, jos penkereestä on uusittu tai uusitaan sekä päällysyttä alusrakenne. Jos radan alusrakennetta ei ole uusittu tai ei tulla uusimaan, on kyseessä vanha penger. Ellei hankkeessa ole selvitetty penkereen rakennetta, voidaan käyttää seuraavissa kappaleissa esitettyjä arvoja.

Vanha penger

Vanhassa penkereessä pengertäyttö tai eristyskerros on usein löyhää - keskitiivistä tai tiivistä hienoa... karkeaa hiekkaa, joka on usein rakeisuudeltaan lajittunutta. Välikerroksen materiaali on yleensä soraa tai hiekkaista soraa. Tukikerrosmateriaali on soraa tai raidesepeliä.

Ellei ole yksityiskohtaisemmin selvitetty, vanhan ratapenkereen geotekniset sekä lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet voidaan määrittää penkereen tiiveyden ja materiaalin rakeisuuden perusteella taulukosta 2.1.

Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje

Taulukko 2.1. Vanhan ratapenkereen geotekniset lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet.

Maalaji		Tilavuuspaino [kN/m ³] pohjavesi- pinnan		Leikkaus- kestävyys- kulma [°]	Muodonmuu- tos- parametrit		Kimmo- moduuli [kPa]
		yläpuo- lalla	alapuo- lalla		m	β	
Hieno hiekkä	Löyhä	15...16	7...	30	50...100	0,5	10 000
	Keski- tiivis			33	100...200	0,5	20 000
	Tiivis	16...18	10	36	200...300	0,5	30 000
Keski- hiekkä	Löyhä	15...17	8...	32	100...200	0,5	15 000
	Keski- tiivis			34	150...300	0,5	30 000
	Tiivis	17...18	10...11	37	200...400	0,5	40 000
Karkea hiekkä	Löyhä	16...18	9...	33	150...300	0,5	20 000
	Keski- tiivis			36	200...400	0,5	40 000
	Tiivis	18...20	11...12	38	300...600	0,5	60 000

Ratapengermateriaalin tiiveys ja rakeisuus määritetään kenttä- ja laboratoriotutkimuksin. Ellei penkereen tiiveystilasta ole tietoa, käytetään suunnittelussa löyhän tilan parametriarvoja.

Mikäli pengermateriaali on muuta kuin hiekkaa, esimerkiksi moreenia, määritetään penkereen materiaaliparametrit tapauskohtaisesti pohjatutkimusten perusteella.

Uusi penger

Uudessa penkereessä pengertäytön yläosa ja eristyskerros tehdään yleensä murskeesta. Välikerroksen materiaali on myös mursketta ja tukikerroksen materiaalina on raidesepeli.

Ellei yksityiskohtaisemmin ole selvitetty, uuden murskeratapenkereen geoteknisinä sekä lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksina voidaan käyttää taulukon 2.2 mukaisia arvoja. Välikerroksen murskeen ominaisuuksina voidaan käyttää InfraRYLissä esitetyjä välikerroksen murskeen tai tien kantavan ja jakavan kerroksen murskeen ominaisuuksia.

Taulukko 2.2. Uuden ratapenkereen (murskepenger) geotekniset lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet.

Maalaji	Tilavuuspaino [kN/m ³] pohjavesi- pinnan		Leikkaus- kestävyys- kulma [°]	Muodonmuu- tos- parametrit		Kimmo- moduuli [kPa]
	Yläpuo- lalla	alapuo- lalla		m	β	
Kallio- murske	21	12	42	1000	0,5	100 000

2.1.3.3 Tiepenger ja meluestepenger

Tiepenkereen ja meluestepenkereen materiaali- ja mitoitusparametrit määritetään tapauskohtaisesti pohjatutkimusten perusteella.

2.2 Mitoitusperusteet

2.2.1 Geotekninen luokka ja seuraamusluokka

Ennen suunnittelun aloittamista kohteelle määritetään Eurokoodin mukainen seuraamusluokka CC ja geotekninen luokka GL. Seuraamusluokka ja geotekninen luokka määritetään noudattaen Liikenneviraston Eurokoodin soveltamisohjetta *NCCI7*. Jos perusteita muiden luokkien käyttöön ei ole, pylväsperustuksilla käytetään seuraamusluokkana luokkaa CC2 ja geoteknisenä luokkana luokkaa GL2. Mikäli tarvetta muiden luokkien käyttöön ilmenee, määritellään tarkempi luokitus hankkeessa rakennekohtaisesti.

2.2.2 Rakenteen käyttöikä

Tämän ohjeen soveltamisalueeseen kuuluvat perustukset suunnitellaan lähtökohtaisesti 50 vuoden käyttöiälle. Hankekohtaisesti voidaan perustuksille kuitenkin käyttää poikkeavia käyttöikävaatimuksia. Poikkeamat tulee esittää hankkeen suunnittelupe-
rusteissa.

2.3 Tekniset vaatimukset

2.3.1 Mitoituksen raja-arvoja

Perustuksen ja ylärakenteen toimivuuden kannalta pitkäaikaisten kuormien aiheuttamien perustusten kiertymien ja siirtymien koko käyttöiän aikana on oltava sellaisia, ettei niistä koidu kohtuutonta haittaa rakenteen käytölle. Riippuen perustettavasta rakenteesta, perustusten kiertymille ja siirtymille on raja-arvot, joita ei saada perustuksen käyttöiän aikana ylittää. Kiertymien ja siirtymien laskennassa käytetään kuormien ja maan lujuusparametrien ominaisarvoja.

Ratapylväsperustuksissa (sähköratapylväät ja rautateiden meluesteet) on pylväiden sijoittelussa otettava huomioon Liikenneviraston julkaisun *RATO 2 Radan geometria* kohdan "Aukean tilan ulottuma" (ATU) asettamat vaatimukset. Ratajohtopylväiden suositeltavat pylväsetäisyydet on esitetty Liikenneviraston ohjeessa *RATO 5 Sähköis-
tetty rata*.

Sähköratapylväät

Suunnittelussa voidaan käyttää seuraavaa oletusta, ellei rakenteille ei ole muita määrävämpiä vaatimuksia.

Sähköratapylväiden kohdalla perustuksen toimivuuden kannalta perustuksen kiertymä koko perustuksen käyttöajan aikana on oltava sellainen, että perustukseen kiinnittyvän pylvään sijaintia voidaan kohtuudella tarvittaessa säätää ilman rakenteellisia muutoksia. Käytännössä tämä tarkoittaa kiertymän suhteen enintään 20 mm korkeuseroa perustuksen pulttien välillä käyttöajan aikana. Pylvään kiinnityspultit on asennettava niin, että niihin jää vähintään 20 mm säätövara pylvään käytönaikaista säätöä varten.

ATUn vaatimusten on toteuduttava perustuksen ja pylvään osalta koko rakenteen käyttöajan ajan. ATUn vaatimusten osalta on otettava huomioon myös RATO 5:ssä esitetyt pylväsperustusten asennustoleranssit ja niiden vaikutus sallittuihin siirtymiin ja kiertymiin.

Kuormien rakenteelle aiheuttamat siirtymät ja kiertymät eivät saa ylittää taulukossa 2.3 esitettyjä raja-arvoja. Taulukon 2.3 raja-arvot ovat voimassa, kun ratapylväsperustuksen yläpinnan sijainti on tavanomainen (noin kv+100 mm). Mikäli perustuksen yläpinnan asema poikkeaa tavanomaisesta, on siirtymien ja kiertymien raja-arvot tarkistettava ko. rakenteelle.

Taulukko 2.3. Rautatien pylväsperustuksen suunnittelussa käytettävät siirtymän ja kiertymän raja-arvot, kun perustuksen yläpinnan asema on tavanomainen.

Mitattava suure	Raja-arvo (muuttuvat kuormat)	Raja-arvo (muuttuvat + pysyvät kuormat)
Perustuksen yläpinnan kiertymä \perp	$\pm 3 \text{ ‰}$	$\pm 4 \text{ ‰}$
Perustuksen yläpinnan kiertymä \parallel	$\pm 3 \text{ ‰}$	$\pm 4 \text{ ‰}$
Perustuksen yläpinnan vaakasiirtymä \perp	$\pm 10 \text{ mm}$	$\pm 15 \text{ mm}$
Perustuksen yläpinnan vaakasiirtymä \parallel	$\pm 10 \text{ mm}$	$\pm 15 \text{ mm}$

\perp Kohtisuoraan rataa vastaan

\parallel Radan suunnassa

Perustuksen ja peruspilarin kokoon vaikuttaa kuormitusten ja perustamisolosuhteiden lisäksi pylvästyypin asettamat vaatimukset.

Perustuksen pinnan korkeus määritetään RATO 5 luvun 5.7.1.4.4.mukaan. Normaalisti sähköratapylvään perustuksen yläpinnan korkeus (perustuksen ja pylvään liitoskohta) on tasolla kv+100 mm. Laitureilla, korkealla penkereellä ym. perustuksen yläpinnan korkeustasona voidaan käyttää RATO 5:ssä esitettyjä poikkeavia arvoja.

Meluesteet

Tien meluesteiden perustusten tai pilareiden sallittujen siirtymien ja kiertymien raja-arvot on esitetty Liikenneviraston julkaisussa *Tien meluesteiden suunnittelu*.

Rautateiden meluesteiden osalta perustusten siirtymien ja kiertymien raja-arvot on esitetty Ratahallintokeskuksen julkaisussa *Rautateiden meluesteet*. Ohjeessa esitettyjen raja-arvojen lisäksi ATUn vaatimusten on toteuduttava koko rakenteen käyttöänsä ajan.

Portaalit ja opasteet

Portaalien ja opasteiden siirtymien ja kiertymien raja-arvot on esitetty Liikenneviraston ohjeessa *Liikennemerkkien rakenne ja pystytys*. Rataympäristössä täytyy myös ATUn vaatimusten täytyä koko rakenteen käyttöänsä ajan.

2.3.2 Laatuvaatimukset

2.3.2.1 Pohjarakenteet

Pohja- ja maarakenteissa käytettävien materiaalien tulee täyttää InfraRYLissä esitetyt vaatimukset. Käytettävien pohjarakennusmateriaalien laadunvarmistus täytyy tehdä InfraRYLin mukaan. Vaatimusten ajantasaisuus täytyy tarkastaa hankekohtaisesti.

Radan painumat ja siirtymät

Ellei hankekohtaisesti ole toisin määritetty, suunnittelun lähtökohtana on, että pohjarakennustöiden johdosta aiheutuvat poikkeamat eivät ylitä RAMO 13:ssa esitetyn virheluokan D mukaisia radan tarkastuksen raja-arvoja yhden vuoden aikana pohjarakennustöiden valmistumisen jälkeen. Lisäksi noudatetaan RATO3 esitettyjä sallitun pysyvän painuman enimmäisarvoja.

Tien painumat ja siirtymät

Tien reunaan tehtävät perustukset eivät saa aiheuttaa paikallisia epätasaisuuksia vierisellä ajoradalla. Tien pinnan on täytettävä Liikenneviraston ohjeen *Tien geotekninen suunnittelu* mukaiset vaatimukset.

2.3.2.2 Betonirakenteet

Perustusten betonirakenteiden suunnittelussa ja laatuvaatimuksissa noudatetaan pääsääntöisesti Liikenneviraston betonirakenteiden suunnittelua koskevaa eurokoodin soveltamisohjetta NCCI2.

Tämän ohjeen sovellusalueeseen kuuluvilla rakenteilla pilareiden pääraudoituksen vähimmäishalkaisija on 16 mm. Pilarin poikkileikkauksen jokaiseen kulmaan sijoitetaan vähintään yksi raudoitetanko. Pyöreään pilariin sijoitetaan vähintään 6 raudoitetankoa. Pilarin raudoitus suositellaan sijoitettavaksi symmetrisesti poikkileikkaukseen.

Betonirakenteiden säilyvyysuunnittelu (mm. rasitusluokka, P-lukuvaatimus) tehdään ohjeiden NCCI2 sekä *by65 Betoninormit 2016* mukaisesti.

2.3.2.3 Teräsrakenteet

Teräsrakenteiden suunnittelussa noudatetaan standardia SFS-EN 1993. Teräspaalurakenteiden suunnittelussa noudatetaan standardia SFS-EN 1993-5.

Korroosio aiheuttaa teräsraketeille seinämävahvuuden menetyksiä. Maahan upotetuilla teräsrakenteilla korroosion aiheuttamina seinämävahvuuden menetyksinä käytetään taulukon 2.4 mukaisia arvoja. Arvot vastaavat 50 vuoden mitoitusiän vaatimuksia.

Taulukko 2.4. Korroosion aiheuttama seinämävahvuuden menetys maahan upotetuille pylväsperustusten teräsrakenteille.

Peruskorroosio	
Tavanomaiset tie- ja rataolosuhteet	1,20 mm
Tie, kunnossapitoluokka 1 ja 1s, perustus sijaitsee alle 10 m etäisyydellä ajoradan reunasta	2,00 mm
Poikkeavat olosuhteet ¹⁾	
Saastuneet luonnonmaat ja teollisuusalueiden maa-alueet	1,50 mm
Aggressiiviset luonnonmaat (suo, räme, turve)	1,75 mm
Tiivistämättömät ja aggressiiviset täyttömaat (tuhka, kuona)	3,25 mm
Putkipaalujen sisäpuolinen korroosio	
Avoin paalu, alapää maakerroksessa, ei tulppaantumista	100 % ulkopuolisesta korroosiosta
Yläpäästä suljettu, alapäästä avoin tulppaantunut paalu; Yläpäästä suljettu, kallioon ulotettu betonoimaton porapaalu (maa-aineksesta puhdistettu)	50 % ulkopuolisesta korroosiosta
Ala- ja yläpäistä suljettu paalu (kalliokärki/maakärki ja yläpäässä tiivis levy)	0,40 mm
Kokonaan betonoitu paalu	0 mm

1) Mikäli on perusteltu syy epäillä maaperän olevan erityisen aggressiivista, täytyy maaperälle tehdä erilliset korroosiotutkimukset

Veteen asennettavissa teräsrakenteissa korroosion aiheuttama seinämävahvuuden menetys määritetään ohjeen *Paalutusohje PO-2016* mukaan.

2.3.2.4 CE-merkintä

Rakennustuotteiden CE-merkinnän vaatimusten osalta noudatetaan Liikenneviraston opasta *Rakennustuotteiden CE-merkintä*.

2.3.3 Harukset ja maadoitus

Sähköratapylväiden harustaminen tehdään RATO 5:n mukaan. Kiristyspylväänä oleva I-pylväs on harustettava. Perustuksen keventämiseksi myös P-pylväs voidaan harustaa.

Pylväsperustukset ja harukset tulee maadoittaa tarpeen mukaan. Ratajohtopylväiden maadoitustarve määritetään ohjeen RATO 5:n mukaan.

Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje

Sähköratapylväillä vanhojen perustusten ympärillä voi olla asennettuna potentiaalin ohjauselektrodi (tasausrengas). Sitä ei saa vaurioittaa rakennustöiden yhteydessä. Mikäli ohjauselektrodia vaurioitetaan, on se korvattava uudella vastaavalla.

3 Kuormat

3.1 Yleistä

Pylväsperustusten rakenteellisessa ja geoteknisessä mitoituksessa tulee ottaa huomioon kaikki rakenteeseen vaikuttavat kuormat ja kuormien yhdistelyt ohjeiden *NCCI1*, *NCCI7*, *RATO 3*, *RATO 5*, *Rautateiden melusteet*, *Tien melusteet*, *Liikennemerkkien rakenne ja pystytys* tässä ohjeessa esitettyjen periaatteiden mukaisesti.

Ylärakenteelta tulevien kuormien lisäksi perustukselle kohdistuu perustamisolosuhteista riippuvia geoteknisiä kuormituksia. Perustusta voi kuormittaa ylärakenteen tyvikuormien lisäksi maan paino, perustuksen omapaino, perustukseen kohdistuva maanpaine, negatiivinen vaippahankaus sekä muut kyseeseen tulevat kuormitukset.

Suunnittelijan on suunnitelmassa otettava huomioon kaikki pylväsperustusta rasittavat kuormat.

3.2 Perustukselle tulevat kuormat

3.2.1 Omapaino

Omapaino muodostuu rakenteiden omasta painosta ja perustuksen päällä olevan maan painosta. Ainoastaan perustuksen päällä oleva maa kuormittaa rakennetta. Omapaino luokitellaan perustusta mitoitettaessa pysyväksi kuormaksi ja sille käytetään pysyvän kuorman osavarmuuslukua.

3.2.2 Maanpaine

Rakenteeseen kohdistuva maanpaine lasketaan Liikenneviraston eurokoodin sovelusohjeen *NCCI7* mukaan. Maanpainetta kohdistuu rakenteeseen, mikäli rakenne sijaitsee esimerkiksi pengerluiskassa, joka ei ole laskennallisesti stabiili. Osavarmuusluvut ja yhdistelykertoimet määritetään sähköratapylväsperustuksille *RATO 5:n* mukaan ja muille perustuksille *NCCI7:n* mukaan.

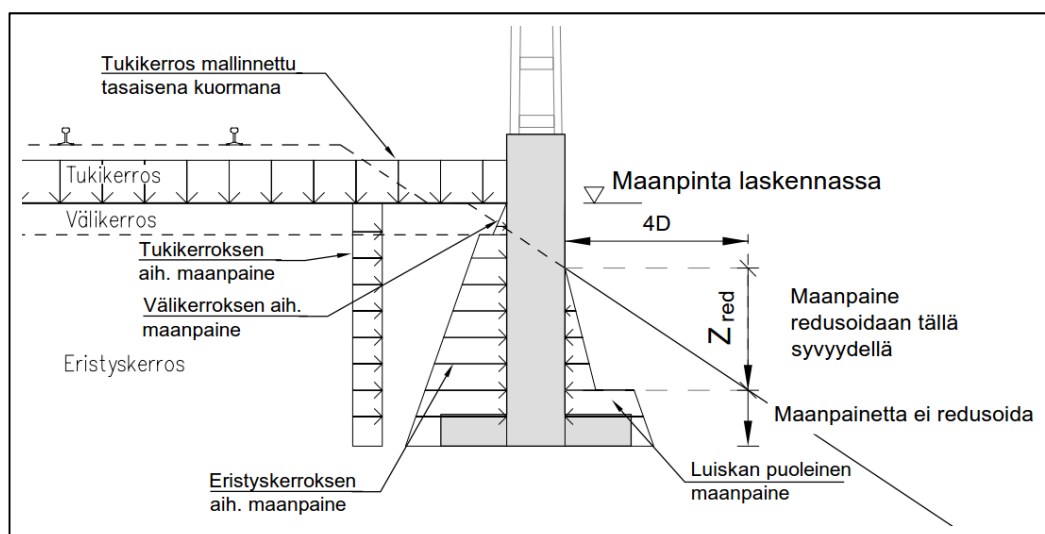
3.2.2.1 Maanvarainen anturallinen perustus

Maanpainekuormitus kohdistuu rakenteeseen penkereen puolelta ja kasvaa luiskan juureen asti ja vaikuttaa sen alapuolella tasaisena kuormana. Maanpainekertoimia laskettaessa täytyy maanpinnan kaltevuus ottaa huomioon.

Ratapylväsperustuksilla maanpainekuorman laskentaa voidaan yksinkertaistaa olettamalla peruspilaria vasten olevan maanpinnan tason välikerroksen yläpintaan. Tukikerros ja sen mahdollinen korotus voidaan mallintaa laskennassa tasaisena kuormana. Maanpainekertoimet määritetään tasaisen maanpinnan mukaan. Luiskan puoleista maanpainetta redusoidaan luiskan kaltevuudesta riippuen taulukon 3.1 mukaisella kertoimella syvyydelle, jolle vaakasuora etäisyys peruspilarin ulkopinnasta luiskan pintaan on pienempi kuin 4 x peruspilarin leveys radan poikkisuunnassa. Esimerkki ratapylväsperustuksen maanpainelaskennasta on esitetty kuvassa 3.1. Esimerkin tapaa voidaan käyttää soveltaen myös tien viereisen anturallisen perustuksen mitoituksessa.

Taulukko 3.1. Ratapylväsperustus, luiskan puoleisen maanpaineen luiskan kaltevuudesta riippuva redusointikerroin (Kulman 2001, s. 84).

Maanpinnan kaltevuus β	Maanpaineen redusointikerroin
tasamaa	1,00
1:4	0,67
1:3	0,56
1:2	0,42
1:1,5	0,33



Kuva 3.1. Maanpaine kuormien yksinkertaistettu laskentamenetelmä ratapylväsperustuksilla.

Perustus pengerialuiskassa, ulkoinen sivukuormitus luiskaan päin

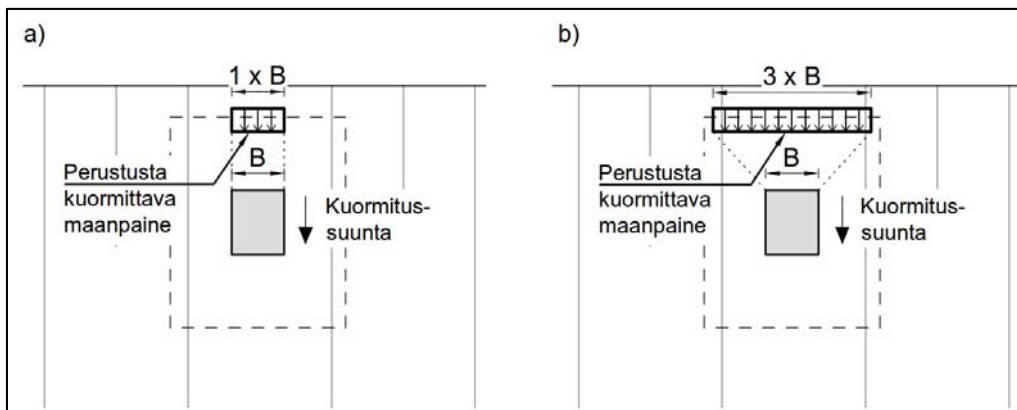
Pengerialuiskaan perustetun anturallisen pylväsperustuksen geoteknisessä mitoituksessa perustusta kuormittaa aktiivinen maanpaine, jonka oletetaan muodostuvan peruspilarin leveyttä vastaavaksi (kuva 3.2a).

Perusteena tälle yksinkertaistetulle mallille, FEM-mallinnuksen mukaan geoteknisessä mitoituksessa luiskan päällä oleva pintakuorma tai liikennekuorma aiheuttaa perustukselle kiertymää penkereen suuntaan painamalla anturan penkereen puoleista reunaa alaspäin. Luiskaan päin tapahtuvassa kuormituksessa mitoittavimmaksi kuormitustapaukseksi muodostuu tapaus, missä perustusta kuormittaa pelkkä maanpaine.

Pengerialuiskaan perustetun anturallisen perustuksen rakenteellisessa mitoituksessa perustuksen pilariosaa kuormittaa maan lepopaine kolminkertaiselta peruspilarin leveydeltä (kuva 3.2b).

FEM-mallinnuksen mukaan rakenteellisessa mitoituksessa luiskan päällä oleva pintakuorma tai liikennekuorma aiheuttaa anturan ja peruspilarin liitoskohdalle lisärasitusta painamalla anturaosaa ja työntämällä peruspilariosaa luiskaan päin. Kuorman laskeminen kolminkertaiselle peruspilarin leveydelle voidaan olettaa sisältävän myös pintakuorman tai liikennekuorman vaikutuksen.

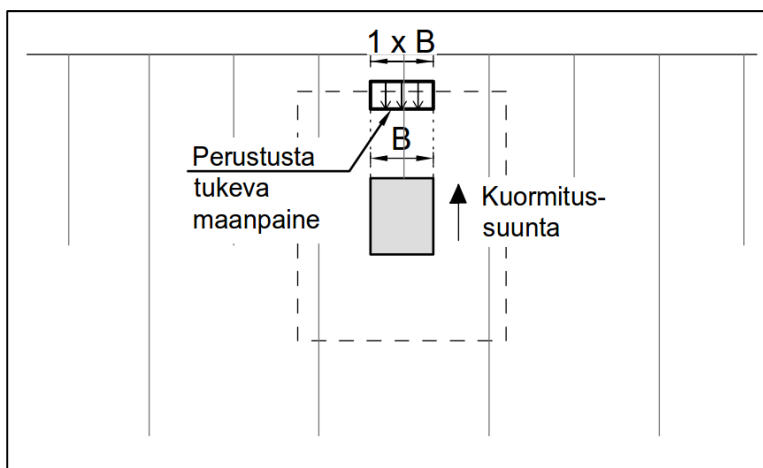
Perustuksen luiskan puoleinen maanpaine voidaan huomioida tukevana kuormana yksinkertaiselta peruspilarinleveydeltä mobilisoitumisasteen mukaan kuvan 3.1. mukaisesti.



Kuva 3.2. Anturallisen ratapylväsperustuksen mitoituksessa käytettävä yksinkertaistettu laskentamalli: a) perustuksen geotekninen mitoitus (aktiivipaine), b) perustuksen rakenteellinen mitoitus (lepopaine).

Perustus pengertuiskassa, ulkoinen sivukuormitus penkereeseen päin

Penkereeseen päin tapahtuvassa sivukuormituksessa voidaan perustusta mitoittaessa penkereen tukeva vaikutus ottaa huomioon yksinkertaiselta rakenteen leveydeltä maanpaineen mobilisoitumisen mukaan (kuva 3.3).



Kuva 3.3. Penkereeseen päin kuormitettua perustusta tukeva maanpaine.

Rajoitus: Kuvissa 3.2 ja 3.3 esitetyt tapoja laskea rakenteeseen kohdistuvat maanpaineet peruspilarin yksin- tai kolminkertaiselta leveydeltä käytetään korkeintaan 1 metrin levyisille rakenteille. Tätä leveämmillä pilareilla ja seinämäisillä rakenteilla maanpaine-kuormitukset määritetään tapauskohtaisesti soveltaen.

3.2.2.2 Paaluperustus

Stabiilissa ja painumattomassa pohjamaassa ja täytössä (tasamaa tai pengerluiska) paaluun kohdistuvat maanpaineet muodostavat tasopainotilan, mikäli kaivu- ja täyttötyöt tehdään ennen paalujen asentamista. Tällöin paaluperustukseen ei oleteta kohdistuvan maanpaine kuormitusta pengerluiskan vaikutuksesta. Oleellista on, asennetaanko paalut ennen vai jälkeen maan siirtymiä aiheuttavia työvaiheita. Mikäli paalujen asentamisen jälkeen tapahtuu maan liikkeitä, aiheutuu niistä toispuolista maanpainetta, joka pitää ottaa huomioon.

3.2.3 Negatiivinen vaippahankaus

Negatiivinen vaippahankaus käsitellään paalun mitoituksessa kuormana. Negatiivisen vaippahankauksen osavarmuuslukuna käytetään pysyvän kuorman osavarmuuslukua. Negatiivista vaippahankausta ei huomioida samaan aikaan lyhytaikaisten kuormitusten kanssa.

Paalun negatiivinen vaippahankaus määritetään ohjeen *RIL 254–2016 Paalutusohje PO–2016* mukaan.

Negatiivista vaippahankausta ei synny, jos paalun kärki jää pehmeään, kokoonpuristuvaan maakerrokseen. Tällöin paalu painuu maakerroksen mukana, eikä vaippahankausta pääse syntymään.

3.2.4 Liikennekuormat

Tasamaalla olevaan tai jatkuvaksi määriteltävään perustukseen kohdistuva liikennekuorma määritetään NCCI7:n ja RATO 3:n mukaan.

Jos pengerluiskassa olevan sivukuormitetun pylväasperustuksen mitoitus tehdään kohdan 3.2.2 mukaisille maanpaine kuormituksille, ei liikennekuorman (junakuorma tai muu liikennekuorma) vaikutusta perustukseen tarvitse lisäksi huomioida.

3.2.5 Ylärakenteilta tulevat kuormat

Perustukselle ylärakenteelta tulevat ulkoiset kuormat määritetään kullekin perustustyyppille kyseistä ylärakennetta koskevan suunnitteluohjeen mukaisesti. Ylärakenteelta tulevat kuormitukset (pystysuuntainen, vaakasuuntainen ja momenttikuormitus) ilmoitetaan perustussuunnittelua varten yleensä ylärakenteen ja perustuksen liitoskohtaan.

Sähköratapylväät

Ohjeen *RATO 5 Sähköistetty rata* luvussa 5.7.3 on esitetty perustusten mitoituksessa vaadittavat kuormitus- ja kuormitusyhdistelmätarkastelut. RATO 5:ssä esitetyt ylärakenteelta eri syistä tulevat kuormat määrittää sähköratasuunnittelija. Ylärakenteelta tulevat kuormat määritetään jokaiseen tarkasteltavaan perustuksen mitoitussuuntaan (luiskaan päin, penkereeseen päin ja radan suuntaisesti) erikseen. Perustussuunnittelija käyttää näitä kuormien arvoja perustusten mitoituksessa.

Meluesteet

Tien melusteilla ylärakenteen perustuksille aiheuttamat kuormitukset määritetään soveltaen Liikenneviraston ohjetta *Tien melusteiden suunnittelu*.

Rautateiden melusteilla ylärakenteen perustuksille aiheuttamat kuormitukset määritetään soveltaen Liikenneviraston ohjetta *Rautateiden melusteet*. Ohittavan junan aiheuttama paine- ja imukuorma määritetään standardien SFS-EN 1991-2 ja UIC 779-1 mukaan. Rautateiden melusteiden aerauslumikuorman ja tuulikuorman määrittäminen tehdään ohjeen *Tien melusteiden suunnittelu* mukaan. Rautateilla aerausajoneuvon nopeudeksi oletetaan 60 km/h ilman tarkempia tarkasteluja.

Portaalit ja opasteet

Portaalien ja opasteiden perustuksille tulevat kuormat määritetään soveltaen Liikenneviraston ohjetta *Liikennemerkkien rakenne ja pystytys*.

3.3 Kuormien yhdistely ja osavarmuudet

3.3.1 Yleistä

Kuormia, jotka ei fyysikaalisista tai toiminnallisista syistä voi esiintyä samanaikaisesti, ei tarvitse ottaa huomioon samanaikaisesti kuormien yhdistelmissä, joista voimasuureet lasketaan.

3.3.2 Murtorajatila

Sähköratapylväät

Sähköratapylväiden perustuksilla kuormitusten yhdistely tehdään RATO 5 luvun 5.7.3 mukaan.

Sähkörataperustusten murtorajatilamitoituksessa kuormien osavarmuuksina käytetään RATO 5 luvun 5.7.3.2 mukaisia osavarmuuslukuja.

Meluesteet

Melusteperustuksilla ylärakenteelta perustukselle kohdistuvien kuormien osalta kuormitusten yhdistely tehdään ohjeiden *Tien melusteet* sekä *Rautateiden melusteet* mukaisesti. Tuulikuorma, junan paine- ja imukuorma sekä aerauslumikuorma ovat yhdistelyissä muuttuvia kuormia. Aerauslumikuorma ei esiinny yhtäaikaaisesti tuulikuorman tai junan paine- ja imukuorman kanssa. Tuulikuorman ja junan paine- ja imukuorman yhdistely tehdään UIC ohjeen 779-1 mukaan. Kun paine- ja imukuorman vaikutus on perustuksen mitoituksen kannalta merkittävä, täytyy huomioida syklisen kuorman vaikutus maan jäykkyYTEEN.

Perustuksen mitoituksessa kuormien osavarmuuksina käytetään Liikenneviraston ohjeessa NCCI1 esitettyjä osavarmuuksia.

Portaalit ja opasteet

Portaaleilla ja opasteilla ylärakenteelta perustuksille tulevien muuttuvien kuormien osavarmuudet ja yhdistelyt määritetään ohjeen *Liikennemerkkien rakenne ja pystytys* mukaan.

Muiden kuormien osavarmuuksina käytetään NCCI1:ssä esitettyjä osavarmuuksia.

3.3.3 Käyttörajatila

Perustusten käyttörajoitus tehdään kuormien ominaisarvoilla. Sähköratapylväille kuormien yhdistely tehdään RATO 5:n mukaan täysillä kuorman arvoilla. Meluesteperustuksilla käyttörajoituksen kuormien yhdistely tehdään ohjeiden *Tien meluesteet* sekä *Rautateiden meluesteet* mukaisesti. Muiden perustusten käyttörajoituksen kuormien yhdistely tehdään NCCI7:n mukaan.

4 Perustustyypit ja perustamisolosuhteet

4.1 Perustamistavat

Pylväsperustukset voidaan jakaa perustamistavan mukaan erityyppisiin perustuksiin. Näitä ovat maanvarainen anturaperustus, kallionvarainen perustus ja paaluperustus, joka käsittää yhden paalun perustuksen sekä paaluryhmän.

4.2 Perustamisolosuhteet

Luiskassa tai penkereessä oleva perustus

Luiskassa olevalla perustuksella tarkoitetaan perustusta, joka on perustettu kaltevalle maanpinnalle tai maanpinnan kaltevuus vaikuttaa perustuksen käyttäytymiseen ja kantokestävyyteen. Luiskaan perustettu perustus voi olla anturallinen perustus tai paaluperustus. Luiskaan perustettuja perustuksia voi olla penkereessä tai maaleikkauksessa.

Anturalliseen perustukseen kaatumissuuntaan alaspäin viettävä luiska vaikuttaa kantokestävyyttä pienentävästi. Paaluperustuksella luiska vaikuttaa paalun sivuvastukseen pienentävästi ja sitä kautta pienentää luiskaan päin kuormitetun paalun sivukuormituskestävyyttä.

Täyttöpenkereessä olevaa perustusta mitoitettaessa täytyy huomioida käytetyn täyttömateriaalin ominaisuudet ja millainen perustustyyppi on mahdollista toteuttaa. Louhetäyttö tai pengermateriaalin kivisyys ja lohkaraisuus voi esimerkiksi vaikeuttaa lyömällä asennettavan putkipaaluperustuksen käyttöä tai hankaloittaa perustuksen kaivutöitä. Penkereissä voi lisäksi olla esimerkiksi aggressiivista tai korroosiota aiheuttavia materiaalia, mikä täytyy selvittää ja ottaa huomioon perustuksen mitoituksessa.

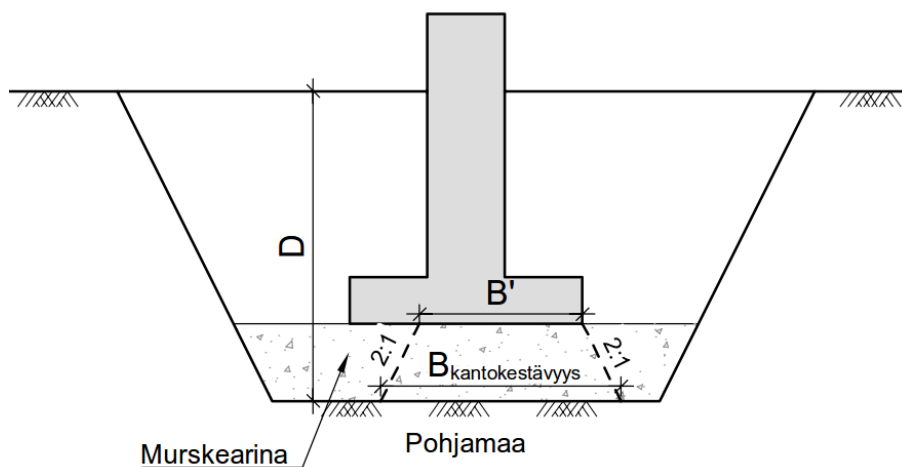
Penkereen alla olevan pohjamaan vaikutus perustuksen käyttäytymiseen täytyy myös tarkastella. Jos pohjamaan materiaaliparametrit ovat heikommat kuin penkereen, pitää mitoitus tarvittaessa tarkistaa liukupinta-analyysillä.

Perustus pehmeiköllä olevan penkereen päällä

Muun muassa melusteillä voi esiintyä tilanne, missä meluste on sijoitettu pehmeikölle rakennetun penkereen päälle. Rakenteen käyttötarkoitus voi määrätä sille tietyn korkeustason, jonka alapuolelle se ei saa käyttöiän aikana painua. Tällaisessa tilanteessa täytyy siirtymiä laskettaessa huomioida perustuksen siirtymien lisäksi myös koko penkereen painuma. Perustus on mitoitettava siten, että ylärakenteen korkeus-taso pysyy vaaditulla tasolla koko rakenteen käyttöiän ajan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että pohjamaata kuormitetaan penkereellä ennen melusteen rakentamista (esikuormitus) tai penkereen painuma otetaan huomioon rakenteen alkukorkeustasoa valittaessa (penkereen painuman oltava tasaista).

Perustus pehmeiköllä murskearinan päällä

Savi- tai siltti pehmeiköllä murskeesta tehdyn perustuksen alustäytön eli niin sanotun murskearinan päälle perustetun anturallisen perustuksen kantokestävyys mitoitusta voidaan yksinkertaistaa olettamalla anturan tehokkaalle alalle kohdistuva pohjapaine jakautuneeksi murskekerroksessa anturan alareunasta kaltevuudella 2:1. Perustuksen kantokestävyys voidaan tällöin mitoittaa pohjamaan parametreille murskekerroksen alapinnassa vaikuttavalle kuormitukselle. Mitoituksessa perustamissyvyys lasketaan murskekerroksen alapinnasta. Perustuksen alapuolisen murskekerroksen paino on otettava huomioon pohjamaalle kohdistuvan pohjapaineen laskennassa. Esimerkki tällaisesta perustuksesta on esitetty kuvassa 4.1. Tätä menetelmää voidaan soveltaa vain tämän ohjeen soveltamisalueeseen kuuluville perustuksille. Alustäytön tulee olla tehty InfraRYLin perustusten alustäytön vaatimusten mukaan.



Kuva 4.1. Kantokestävyuden määrittäminen murskearinan varaan pehmeikölle perustetulle anturalliselle perustukselle. Tätä menetelmää voidaan soveltaa vain tämän ohjeen soveltamisalueeseen kuuluville perustuksille.

Perustus kalliolla

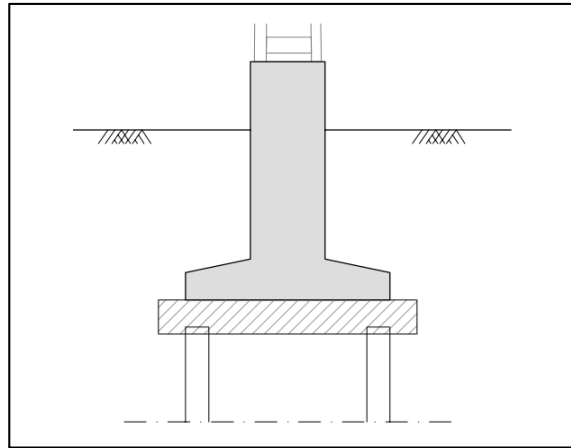
Kallionvarainen perustus voidaan perustaa suoraan kallion päälle tai alusvalulla tasatun kallion päälle NCCI7 mukaisin rajoituksin.

Suoraan kallion varaan perustetun sivukuormitetun pylväasperustuksen sivukuormituskestävyyttä voidaan parantaa esimerkiksi kallioon injektoitavilla tartuntateräksillä.

Anturaperustuselementti pienen paalulaatan päällä

Pylväasperustus voidaan tehdä myös anturaperustuselementin ja pienen paalulaatan yhdistelmänä (kuva 4.2). Paalujen päälle valetaan tai asennetaan teräsbetonilaatta, jonka päälle asennetaan anturaperustuselementti. Perustuksen paalulaattaosa mitoitetaan luvun 7.5 mukaisesti paaluryhmänä.

Paalulaatan päälle asennettavan perustuselementin kaatumisvarmuus mitoitetaan kuten kallionvaraisella perustuksella. Perustuselementin kestävyys liukumista vastaan mitoitetaan kuten kallionvaraisella perustuksella. Perustuselementin ja peruslaatan välisenä kitkakertoimena voidaan käyttää korkeintaan arvoa 0,5.



Kuva 4.2. Paalulaatan varaan tehty anturaperustus.

5 Maanvarainen anturaperustus

5.1 Yleistä

Maanvaraisen anturaperustuksen mitoitus tehdään pääsääntöisesti Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeen *Geotekninen suunnittelu – NCCI7* mukaisesti.

Perustus katsotaan maanvaraiseksi, kun se on perustettu suoraan maan varaan tai kallion päälle rakennetun murskearinan varaan, jonka paksuus on 200 mm tai enemmän. Kantokestävyykskaavalla lasketun maan kantokestävyyden ominaisarvon maksimiarvo on 2 MPa. Anturan alapinnan jännitys jakauman muotona käytetään suorakaidetta.

Kestävyyden lisäksi anturaperustuksen mitoituksessa tarkastetaan, että anturaperustuksen painumat ja siirtymät eivät ylitä niille asetettuja raja-arvoja.

5.2 Murtorajatilamitoitus

5.2.1 Yleistä

Murtorajatilatarkastelussa käytettävät kuormitusyhdistelmät ja kuormien osavarmuudet on esitetty luvussa 3. Maan kestävyyden ja kantokestävyyden osavarmuuksina käytetään NCCI7:n mukaisia osavarmuuslukuja.

5.2.2 Kantokestävyys

Kantokestävyys määritetään STR/GEO-rajatilassa NCCI7:ssä esitettyä kantavuuskaavaa ja DA2*-menetelmää käyttäen. NCCI7:ssä esitetystä laskentamenetelmästä poikkeavan menetelmän käyttö edellyttää Liikenneviraston hyväksymistä.

Kuorman resultantin tulee sijaita DA2*-menettelyä käytettäessä sellaisen ellipsin sisällä, jonka puoliakselit ovat peruslaatan sivumittojen kolmannekset ja keskipiste peruslaatan keskipiste.

5.2.3 Maanpinnan kaltevuuden vaikutus kantokestävyyteen

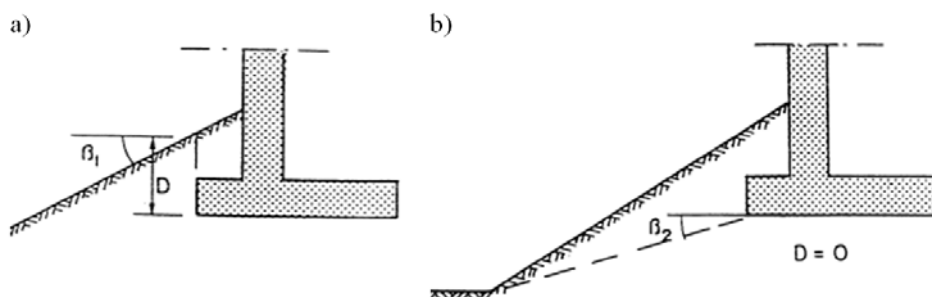
Maanpinnan kaltevuuden vaikutus kantokestävyyteen huomioidaan pienentämällä tasaiselle maanpinnalle laskettua kantokestävyyttä maanpinnan kaltevuudesta riippuvalla pienennyskertoimella g (taulukko 5.1).

Taulukon 5.1 mukaisia kertoimia voidaan käyttää vain tämän ohjeen sovellusalueeseen kuuluvilla perustoilla. Tämän ohjeen sovellusalueen ulkopuolelle jäävillä perustoilla luiskankaltevuus tulee huomioida NCCI7:n mukaisesti.

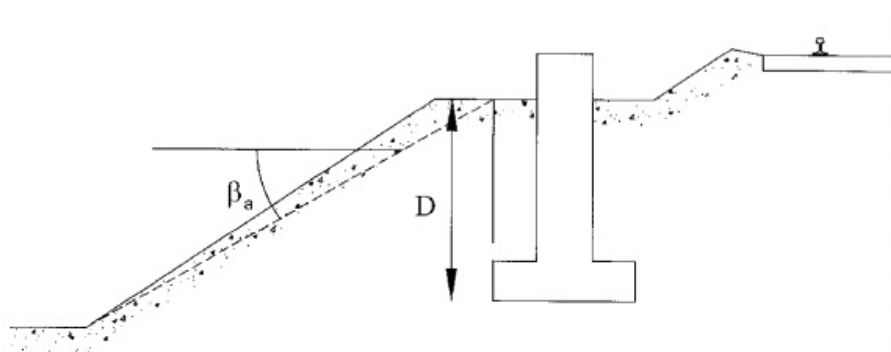
Taulukko 5.1. Korjauskorroin g maanpinnan kaltevuuden β funktiona (Kulmala 1995).

Maanpinnan kaltevuus β	Korjauskorroin g
1:4	0,58
1:3	0,48
1:2	0,35
1:1,5	0,23

Kaltevuuskorjaus voidaan laskea kahdella vaihtoehtoisella tavalla. Laskentatavat ja luiskankaltevuuden sekä perustamissyvyyden määrittäminen on esitetty kuvassa 5.1. Kuvan 5.1a tapauksessa perustamissyvyys lasketaan anturan etureunasta pystysuoraan ylöspäin luiskankaltevuuden pintaan. Kuvan 5.1b tapauksessa perustamissyvyytenä käytetään arvoa $D = 0$. Mitoittavaksi tapaukseksi valitaan kantokestävyytlaskennan kannalta edullisempi vaihtoehto.


 Kuva 5.1. Kaltevan maanpinnan huomioon ottaminen:
 a) laskentatapa 1, b) laskentatapa 2.

Mikäli luiska ei ala heti anturallisen perustuksen anturaosan etureunan kohdalta vaan perustus sijaitsee luiskankaltevuuden päällä, määritetään luiskankaltevuus β ja perustamissyvyys D kuvan 5.2 mukaan.



Kuva 5.2. Kaltevan maanpinnan huomioon ottaminen, kun luiska alkaa perustuksen reunan ulkopuolelta.

Luiskassa olevan perustuksen eri puolilla olevien maakerrosten paksuuksien eron vaikutus tulee ottaa huomioon kuormituksen epäkeskisyyttä laskettaessa.

5.2.4 Liukuminen

Liukumistarkastelu tehdään STR/GEO-rajatilassa NCCI7:n mukaisesti. Liukumistarkastelu tehdään aina vaakakuorman resultantin suuntaan.

Liukumistarkastelussa on huomioitava ylärakenteelta tulevat vaakasuuntaiset kuormitukset sekä mahdollisesti perustusta kuormittava maanpaine. Tukevista kuormista voidaan huomioda vain pysyvien kuormien vaikutus.

5.3 Käyttörajatilamitoitus

5.3.1 Yleistä

Käyttörajatilamitoituksessa täytyy osoittaa, että perustuksen painumat, painumaerot, siirtymät, kiertymät ja muodonmuutokset eivät ylitä luvun 2.3.1 mukaisia rakenteen ja rakenteen toimivuuden edellyttämiä raja-arvoja. Käyttörajatilan laskennassa käytetään kuormien ja ominaisuuksien ominaisarvoja.

Rakenteen sallittuja painumia ja kiertymiä määritettäessä tulee ottaa huomioon painumisen nopeus. Esimerkiksi sähköratapylväällä ratapenkereen rakentaminen saattaa aiheuttaa suurimman osan painumista jo ennen pylvään asentamista.

5.3.2 Painumat

Pohjamaan tai täytön painuma voidaan laskea tunnetuilla menetelmillä tai yksityiskohtaisemmin elementtimenetelmillä.

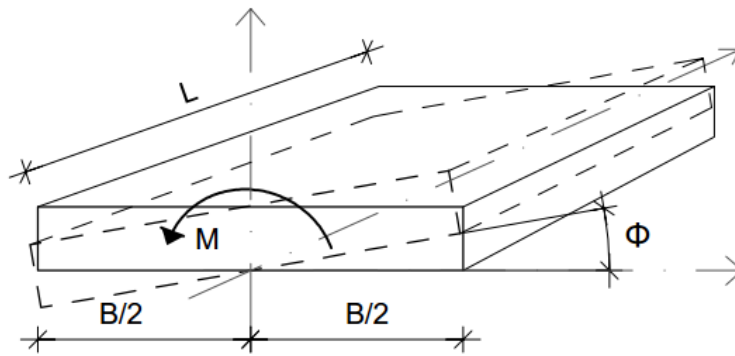
5.3.3 Kiertymät

Perustuksen kiertymät voidaan laskea kaikilla pätevillä menetelmillä, esimerkiksi elementtimenetelmällä tai perustuksen eri kulmissa/reunoilla määritettyjen painumien perusteella.

Käsin laskemalla sivukuormitetun anturallisen perustuksen kiertymiä voidaan arvioida yhtälöllä 5.1 (Poulos & Davis 1974). B ja L valitaan momentin suunnan mukaan niin, että momentti kiertää L-suunnan ympäri (kuva 5.3). Pohjamaan lujuus- ja muodonmuutosparametrit määritetään luvun 2.1.3 mukaan.

$$\phi = \frac{M(1-\nu^2)}{B \cdot L^2 \cdot E_s} \cdot I_\theta \quad (5.1)$$

missä ϕ on perustuksen kiertymä
 M on perustamistasossa perustuksen keskellä vaikuttava momentti
 ν on pohjamaan Poissonin luku (taulukko 5.3)
 E_s on pohjamaan kimmomoduuli (yhtälö 5.2)
 I_θ on perustuksen muotokerroin (taulukko 5.2)



Kuva 5.3. Yhtälössä (5.1) käytettyjen anturan sivumittojen ja kuormituksen suunnat.

Taulukko 5.2. Perustuksen muodosta riippuva kerroin I_θ . Väliarvot voidaan interpoloida. (Poulos & Davis 1974 s. 169).

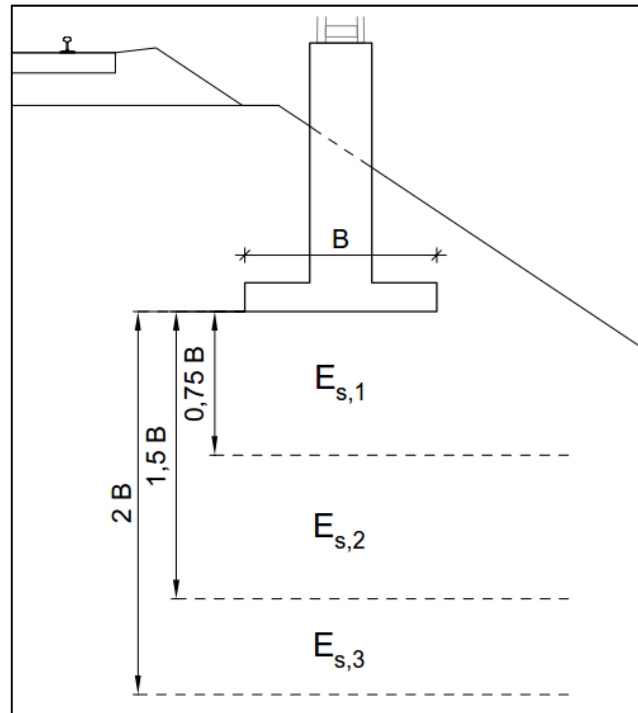
B/L	0,1	0,2	0,5	1	1,5	2	5	10
I_θ	1,59	2,29	3,33	3,7	4,12	4,38	4,82	4,93

Taulukko 5.3. Eri maalajien tyypillisiä Poissonin lukuja.

Maalaji	ν
Siltti	0,3
Hiekka (löyhä)	0,25
Hiekka (tiivis)	0,2
Sora (löyhä)	0,25
Sora (tiivis)	0,2
Moreeni	0,2...0,3
Murske	0,15

Laskennassa kimmomoduulina käytetään yhtälön 5.2 mukaisesti laskettua painotettua kimmomoduulia. Maapohjan jako kerroksiin tehdään kuvan 5.4 mukaisesti.

$$E_s = \frac{1}{6} (3E_{s,1} + 2E_{s,2} + E_{s,3}) \quad (5.2)$$



Kuva 5.4. Painotetun kimmomoduulin määrittäminen.

Eri kerrosten kimmomoduulina voidaan käyttää kerroksen keskelle yhtälön 5.3 mukaisesti laskettua kimmomoduulia.

$$E_{s,i} = m_i \cdot \theta_0 \left(\frac{\theta_i}{\theta_0} \right)^{\beta_i} \quad (5.3)$$

missä $E_{s,i}$ on maakerroksen i kimmomoduuli
 m_i on maakerroksen i moduuliluku
 θ_i on pääjännitysten summa kerroksen i keskellä
 θ_0 on vertailujännitys 100 kPa
 β_i on maakerroksen i jännityseksponentti

6 Kallionvarainen perustus

6.1 Yleistä

Kalliovaraisen perustuksen mitoitus tehdään pääsääntöisesti NCCI7:n kallionvaraista perustusta koskevan ohjeistuksen mukaisesti. Perustus katsotaan kallionvaraiseksi, kun perustus on valettu suoraan tai täyttövalun välityksellä kallioon.

Kallion laatu ja kestävyys selvitetään NCCI7:ssa annettujen ohjeistusten mukaisesti.

6.2 Kallionvaraisen perustuksen mitoitus

6.2.1 Kantokestävyys

Kallionvaraisen perustuksen kantokestävyys määritetään STR/GEO-rajatilassa NCCI7:n kallionvaraista perustusta koskevien ohjeiden mukaan. Kalliolle perustettaessa anturan pohjapaineen oletetaan olevan lineaarinen eikä kallion ja ankkuroimattoman perustuksen välille katsota muodistuvan vetojännityksiä.

Kallionvaraisen perustuksen mitoitus tehdään anturan alla vallitsevalle suurimmalle jännitykselle, jonka mitoitusarvo ei saa ylittää kallion kantokestävyyden mitoitusarvoa.

Kiinteän kallion kantokestävyyden ominaisarvona voidaan ilman kalliotutkimuksia käyttää enintään arvoa 8 MPa. Suuremman arvon käyttäminen edellyttää kallioteknisen suunnittelijan kalliotutkimuksiin perustuvan arvion.

Runsas- tai tiheärakoisella kalliolla kantokestävyyden ominaisarvon määrittää kalliotekninen suunnittelija tai kantokestävyys lasketaan kuten maanvaraisesti perustettaessa.

6.2.2 Kaatuminen

Kallionvaraisen perustuksen kaatumistarkastelu tehdään EQU-rajatilassa NCCI7:n mukaisesti. Kalliolle perustettaessa suorakaiteen muotoisella anturalla kaatumistarkastelu tehdään perustuksen uloimman reunan suhteen molemmissa pääsuunnissa ja tarvittaessa myös resultantin suunnassa.

6.2.3 Liukuminen

Liukumistarkastelu tehdään STR/GEO-rajatilassa DA2*-menetelmällä NCCI7:n kallionvaraisen perustuksen liukumistarkastelua käsittelevän osion mukaisesti.

Liukumistarkastelu tehdään aina vaakakuorman suurimman resultantin suuntaan, jos kallion tai murskekerroksen yläpinta on vaakasuora. Kallion pinnan voidaan olettaa olevan vaakasuoran, jos se on louhittu ja sen kaltevuus $\leq 15^\circ$ tai sen pinta on louhittu portaittaiseksi. Jos kallion pinta on louhimaton ja sen kaltevuus on suurempi kuin 15° on se otettava huomioon liukumisvarmuutta laskettaessa.

6.3 Tartuntateräksiset ja ankkurit

6.3.1 Tartuntojen ja ankkurien käyttö

Kallionvaraisten (suoraan kallion varaan tai täytevalun päälle perustettu) pylväasperustusten sivukuormituskestävyyttä on mahdollista parantaa tartuntateräksillä tai ankkuroinnilla. Tartuntateräksien ja ankkurien suunnittelussa noudatetaan soveltuvien osin Liikenneviraston eurokoodin sovellusohjetta NCCI7.

Kallionvaraiset anturalliset perustukset tulee mitoittaa siten, ettei tartuntateräksiä tai ankkureita tarvita pysyville kuormille. Anturan alla oleva pohjapaine oletetaan kolmionmuotoiseksi ja koko anturan pohjan alan täytyy olla puristettuna pysyvien kuormien vaikutuksesta.

Tartuntaterästen ja ankkurien käyttäminen perustuksen liukumisvarmuuden kasvattamiseen mitoitetaan NCCI7:n kallionvaraisen perustuksen liukumista käsittelevän osion mukaisesti.

6.3.2 Tartuntateräksiset

Tartuntateräksinä käytetään kallioon juotettavia kuumasinkittyjä harjateräksiä. Terästankoina käytetään B500B, A500HW tai muuta standardin SFS 1268 vaatimukset täyttävää hitsattavaa kuumavalssattua betoniterästä, ja sen tulee olla SFS-sertifioitu.

Tartuntateräksinä käytettävien harjaterästankojen vähimmäishalkaisija on 20 mm. Kallioon porattavan reiän halkaisijan tulee olla vähintään 1,5 kertaa teräksen halkaisijan suuruinen ja reiän pituuden tulee olla vähintään 50 mm pidempi kuin reiässä olevan teräksen pituus. Tartuntaterästen juotospituus on vähintään 1,0 m ehjään kallioon.

Tartuntaterästen mitoitus tehdään soveltaen ohjetta NCCI7 sekä ohjeen *RIL 263-2014 Kaivanto-ohje* kallioankkurien mitoitusta koskevaa lukua. Tartuntateräksen mitoituksessa täytyy tarkastaa seuraavat asiat:

- juotoslaastin ja porareiän seinämän välinen tartuntalujuus
- tartuntateräksen ja juotoslaastin välinen tartuntalujuus
- kallioista irtoavan kartion riittävä paino
- tartuntateräksen rakenteellinen kestävyys.

6.3.3 Ankkurit

Ankkureita käytettäessä ankkurit suunnitellaan ja mitoitetaan ohjeen NCCI7 mukaisesti. Ankkureiden koeveto ja laadunvarmistus tehdään NCCI7:n mukaisesti.

7 Paaluperustukset

7.1 Yleistä

Sivukuormitetun paaluperustuksen mitoitus tehdään soveltuvien osien Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeen NCCI7 sekä ohjeen *RIL 254–2016 Paalutusohje 2016* mukaisesti. Tässä suunnitteluohjeessa esitetään näistä ohjeista poikkeavat tai niitä tämentävät ohjeet.

Lyömällä asennettavien paaluperustuksen käyttäminen pylväsperustuksina vaatii riittävän tiedon vallitsevista pohjaolosuhteista. Paalun lyöntisyvyydellä on merkittävä vaikutus paalun sivukuormituskestävyyteen, joten riittävän lyöntisyvyyden saavuttaminen on varmistettava pohjatutkimuksilla. Esimerkiksi kivinen maa tai kallionpinnan läheisyys voi estää paalujen tunkeutumisen riittävän syvälle. Vaadittavat pohjatutkimukset on esitetty tarkemmin luvussa 2.1.2.

Alapäästä avonaisten putkipaalujen ei oleteta tulppaantuvan lyömällä tapahtuvan asennuksen seurauksena. Jos tulppaantumista käytetään mitoitusperusteena, on tulppaantuminen osoitettava koepaaluilla.

Maan käyttäytyminen sivukuormitetun paaluperustuksen ympärillä ei ole lineaarista, vaan maan paaluun kohdistamaan sivuvastukseen vaikuttaa maan lujuusominaisuuksien lisäksi myös rakenteen siirtymät. Vaakakuormien tai -siirtymien rasittamien paalujen mitoitus täytyy tehdä käyttämällä rakennemallia, joka ottaa huomioon sekä paalun että maan muodonmuutosominaisuudet. Tämä voi tapahtua esimerkiksi kuvamalla maan ominaisuuksia paalua tukevalla jousilla. Paalua ympäröivä maa korvataan yksittäisten kimmoisten jousien muodostamalla jousisarjalla, missä jousien jäykkyyksiä kuvataan alustaluvuilla. Tätä mitoitusmenetelmää kutsutaan yleisesti alustalukumenetelmäksi.

Pylväsperustuksina toimivat paalut ovat yleensä suhteellisen lyhyitä paaluja, jolloin paalu kiertyy maassa lähes jäykkänä kappaleena kiertokeskiönsä ympäri ympärillä olevan maan lujuuden pettäessä ennen paalun rakenteellista lujuutta. Kiertokeskiön sijainti riippuu kuormituksen suuruudesta sekä maan ja paalun jäykkyydestä. Rakennemalli on muodostettava tapauskohtaisesti. Tavallisessa lyöntipaalutapauksessa pylväsperustuksena toimivan paalun alapään siirtymävapausasteita ei saa rajoittaa, vaan rakennemalli on muodostettava siten, että kiertokeskiö pääsee vapaasti syntymään. Joissakin tapauksissa, esimerkiksi porapaaluperustuksella, on perusteltua käyttää rakennemallina mallia, jossa paalun alapää ei pääse siirtymään. Alustalukumenetelmää käytettäessä rakennemallin jousivälin tulee olla riittävän tiheä, jotta laskenta-analyyysiin saadaan riittävä tarkkuus.

Alustalukumenetelmään perustuva mitoitus suositellaan tehtäväksi laskentaohjelmalla, jolla voidaan mallintaa jousen kimmoisen alueen epälineaarinen käyttäytyminen. Tällöin laskenta saadaan tehtyä yhdellä laskentakierroksella.

Porapaaluilla paalun porauspituus ja mitoituksessa käytettävä rakennemalli määritetään NCCI7:n mukaan.

Porapaalutus voi löyhdyttää maata paalun ympärillä ja siten vaikuttaa sivukuormitetun paalun alustalukuihin pienentävästi. Porapaalun asennuksessa tulee käyttää sellaista menetelmää, missä ilman karkaus ympäristöön on vähäistä.

Vaihtoehtoisesti sivukuormitetun paaluperustuksen mitoitus voidaan tehdä esimerkiksi tarkoitukseen sopivaa 3D-elementtimenetelmää käyttäen.

Sivukuormitetuilla yhden paalun perustuksilla käyttörajatilamitoitus muodostuu yleensä määrääväksi mitoitusapaukseksi. Yhden paalun perustuksille on suositeltavaa tehdä käyttörajatilamitoitus ennen murtorajatilamitoitusta.

7.2 Murtorajatilamitoitus

7.2.1 Yleistä

Murtorajatilatarkastelussa täytyy osoittaa, että kuormien tai kuorman vaikutusten mitoitusarvo (E_d) on pienempi tai yhtä suuri kuin kestävyysmitoitussarvo (R_d).

Murtorajatilamitoitus tehdään NCCI7:n mukaan STR/GEO-rajatilassa käyttäen menetelmää DA2*.

Kuormat ja kuormien osavarmuudet määritetään perustettavasta rakenteesta riippuen luvun 3 mukaisesti. Maan kestävyysmitoitussarvo $\gamma_{Re} = 1,5$.

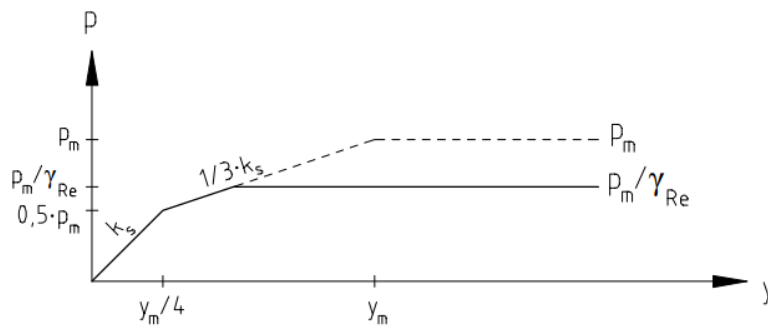
Sivukuormituskestävyyden lisäksi paaluperustuksille pitää tarkastaa paalun kantokesävyys ja tehdä myös muut NCCI7:ssä vaaditut kestävyystarkastelut (painuma).

Geoteknisen mitoituksen lisäksi paalulle täytyy tehdä myös tarpeelliset rakenteelliset tarkastelut (mm. taivutus- ja nurjahduskestävyys).

7.2.2 Sivukuormitetun paaluperustuksen murtorajatilamitoitus alustalukumenetelmällä

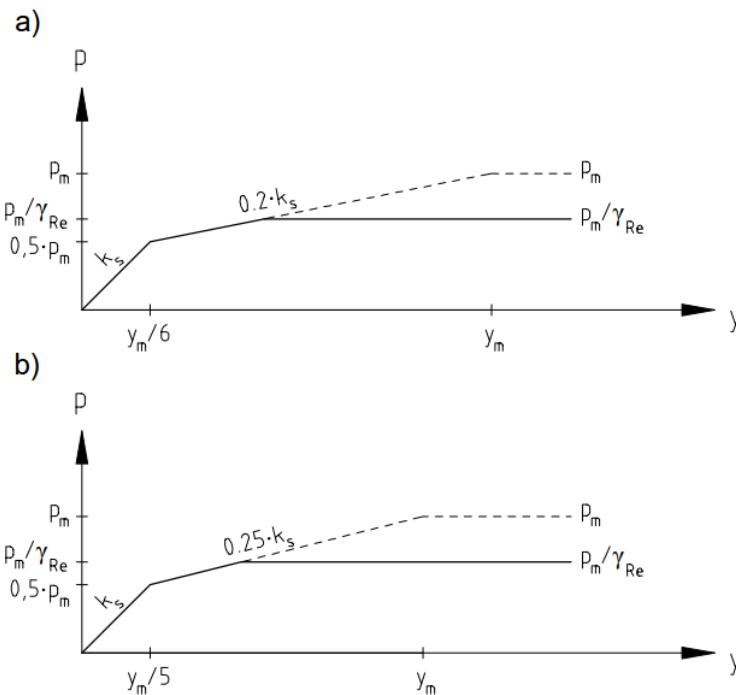
Paalua ympäröivän maan kestävyysmitoituksessa murtorajatilamitoituksessa alustaluvut määritetään käyttäen maan lujuusparametrien ominaisarvoja. Maan kestävyysmitoituksessa varmuus kohdistetaan maan sivuvastuksen ääriarvoon, joka määrittää rakennemallin jousituen suurimman tukivoiman. Rakennemallissa jousituen ääriarvona käytetään maan kestävyysmitoitussarvulla jaettua sivuvastuksen ääriarvon ominaisarvoa (kuvien 7.1 ja 7.2 yhtenäiset viivat).

Paalun rakenteellisen kestävyysmitoitukseen tehdään käyttäen maan lujuusparametrien ominaisarvojen mukaan määritettyjä alustalukuja ja jousiarvoja. Paalumateriaalin osavarmuus otetaan huomioon. Rakennemallissa sivuvastuksen ääriarvona käytetään sivuvastuksen ääriarvon ominaisarvoa (kuvien 7.1 ja 7.2 katkoviiva).



Kuva 7.1. Sivupaine-siirtymäyhteyden määrittäminen murtorajatilalaskennassa kitkamaassa.

Kuvassa 7.1 yhtenäisellä on viivalla esitetty maan kestävyuden tarkastelussa käytettävä sivuvastuksen kehittyminen. Katkoviivalla on esitetty rakenteen kestävyuden mitoituksessa käytettävä sivuvastuksen kehittyminen.

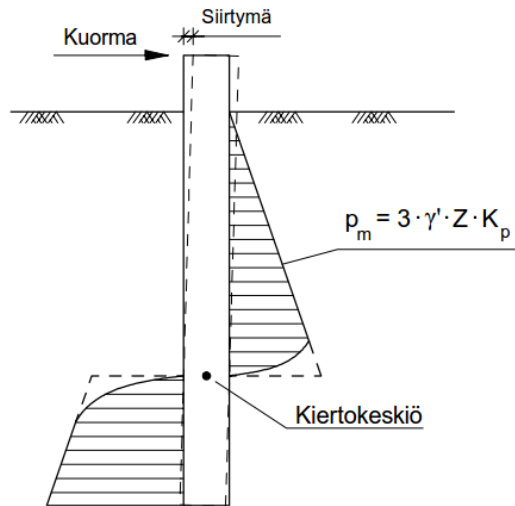


Kuva 7.2. Sivupaine-siirtymäyhteyden määrittäminen murtorajatilalaskennassa koheesiomaassa, a) lyhytaikainen kuormitustilanne, b) pitkäaikainen kuormitustilanne.

7.2.3 Murtorajatilatarkastelu käsin laskemalla

Yksinkertaisissa tapauksissa murtorajatilatarkastelu voidaan tehdä käsilaskentamenetelmällä ilman numeerisia laskentaohjelmia. Käsilaskentamenetelmää voidaan soveltaa karkearakeisille pohjamailla, joissa on homogeeniset olosuhteet.

Kun maa paalun ympärillä on täysin plastisoitunut, on jäykkänä kappaleena kiertyvän paalun sivuvastusjakauma kuvan 7.3 yhtenäisen viivan mukainen. Kiertokeskiön läheisyydessä sivuvastus ei pääse kehittymään ääriarvoon asti, koska vaakasuuntaiset siirtymät eivät muodostu riittävän suuriksi. Laskennan yksinkertaistamiseksi sivuvastuksen ääriarvon voidaan kuitenkin olettaa täysin kehittyneeksi myös kiertokeskiön ympäristössä (kuvan 7.3 sivuvastuskuvaajan katkoviiva), jolloin sivuvastuskuvaajat ovat suoraviivaisia.



Kuva 7.3. Sivuvastuksen ääriarvo (ominaisarvo) jäykkänä kappaleena kiertyvän paalun ympärillä.

Murtorajatilatarkastelu karkearakeisessa maassa voidaan yksinkertaistettuna tehdä seuraavalla tavalla.

- Perustukseen kohdistuvan sivupaineen ääriarvon murtotilassa oletetaan olevan karkearakeisella maalla $p_m = 3 \cdot \gamma' \cdot z \cdot K_p$ ja sen oletetaan olevan kolmiomaisesti jakautunut. Sivupaineen ääriarvossa luiskun vähentävä vaikutus tulee ottaa huomioon kohdan 7.4.2 mukaisesti
- Lasketaan perustuksen murtokapasiteetti perustuksen yläpään tasossa syvyydellä z sijaitsevan kiertokeskiön suhteen ($H_u(z)$ ja vastaava $M_u(z)$).
- Piirretään perustuksen H_u - M_u -kapasiteettikuvaaja eri z -arvoja vastaavista voima-momentti -pareista
- Todetaan kapasiteettikuvaajan avulla, että kaikki tyvikuormitusten laskenta-arvot ovat pienempiä kuin perustuksen kapasiteetti.

Menetelmän edellytyksenä on, että perustus toimii jäykkänä kappaleena, mikä on osoitettava.

Sivukuormitetun paalun käyttäytyminen riippuu maan ja paalun suhteellisesta jäykkyydestä sekä paalun kiinnityksestä rakenteeseen. Sivukuormitetun paalun käyttäytymistä maassa voidaan karkearakeisessa maassa arvioida parametrilla T (yhtälö 7.1).

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}}, \quad (7.1)$$

missä EI on paalun taivutusjäykkyys

n_h on vaakasuuntainen alustalukukerroin karkearakeisessa maassa.

Paalun upotussyvyyden L ja parametrin T suhteen L/T eli jäykkyyssuhteen ollessa pienempi kuin kaksi, käsitellään paalua maassa kiertyvänä jäykkänä kappaleena, jolloin paalun muodonmuutoksia ei tarvitse ottaa huomioon. Lyhyt ja jäykkä paalu kiertyy maassa kiertokeskuksensa ympäri ja maan murtuminen tapahtuu ennen paalun myötäämistä. Kun jäykkyyssuhde L/T on vähintään neljä, laskelmissa täytyy huomioida myös paalun muodonmuutokset. Jäykkyyssuhdetta neljä vastaavaa paalupituutta voidaan pitää sivuvastuksen suhteen paalun toiminnallisena ääriarvona. Perustuksen pitiuuden lisääminen ei tällöin enää vaikuta paalun toimintaan, vaan paalun murtuminen tapahtuu ennen maan murtumista.

Alustalukukerroin n_h määritetään ohjeen Paalutusohje PO-2016 mukaan.

Edellistä vaativammissa olosuhteissa (kerroksellinen tai hienorakeinen maa) sivukuormitetun paaluperustuksen murtorajamitoitus täytyy tehdä kohdan 7.2.2 mukaisesti.

7.3 Käyttörajatilamitoitus

Käyttörajatilamitoituksessa täytyy osoittaa, että perustuksen painumat, painumaerot, siirtymät, kiertymät ja muodonmuutokset eivät ylitä rakenteelle asetettuja ja rakenteen toimivuuden edellyttämiä raja-arvoja.

Sivukuormitetun paaluperustuksen vaakasuuntaiset siirtymät voidaan laskennallisesti määrittää alustalukumenetelmää käyttäen. Siirtymät voidaan määrittää myös tarkoitukseen sopivaa elementtimenetelmäohjelmaa käyttäen. Paaluperustuksen vaakasiirtymien arvioinnissa tulee ottaa huomioon maan jäykkyys, paalun taivutusjäykkyys, kuormitukset ja niiden suunnat ja kuormitusten toistuvuus ja kestoajat.

Käyttörajatilamitoitus tehdään käyttäen kuormitusten ja maan kestävyysominaisarvoja. Kuormitusyhdistelmät määritetään kohdan 3.3.3 mukaan. Alustaluvut määritetään kohdan 7.4 mukaan käyttäen maan kestävyysominaisarvoja.

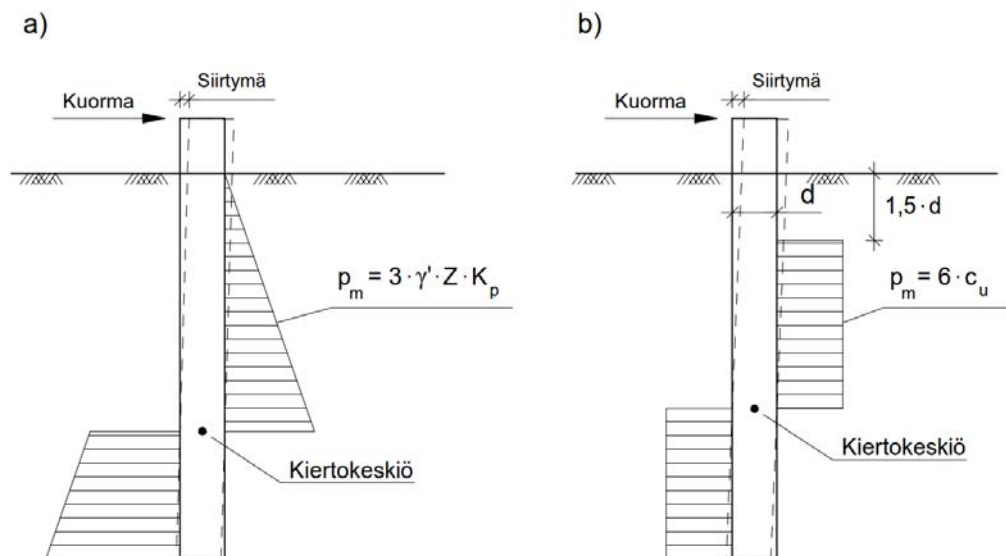
Luiskassa olevan paaluperustuksen luiskaan päin tapahtuvia siirtymiä laskettaessa luiskan vaikutus sivuvastukseen täytyy ottaa huomioon alustalukuja määritettäessä. Luiskan vaikutus alustalukuihin käyttörajatilassa on esitetty luvussa 7.4.2.

7.4 Alustalukumenetelmä

7.4.1 Alustalukujen määrittäminen

Paalun ympärillä olevan maan käyttäytymistä kuvaavat alustaluvut (ja jousiarvot) määritetään Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeen ohjeen NCCI7 paalujen vaakakuormituskestävyyttä koskevien osion mukaisesti.

Paaluun kohdistuvan sivuvastuksen ominaisarvon ääriarvo p_m määritetään kuvan 7.4 mukaisesti.



Kuva 7.4. Paaluun kohdistuvan sivuvastuksen p_m ominaisarvon ääriarvot a) kitkamaassa ja b) koheesiomaassa.

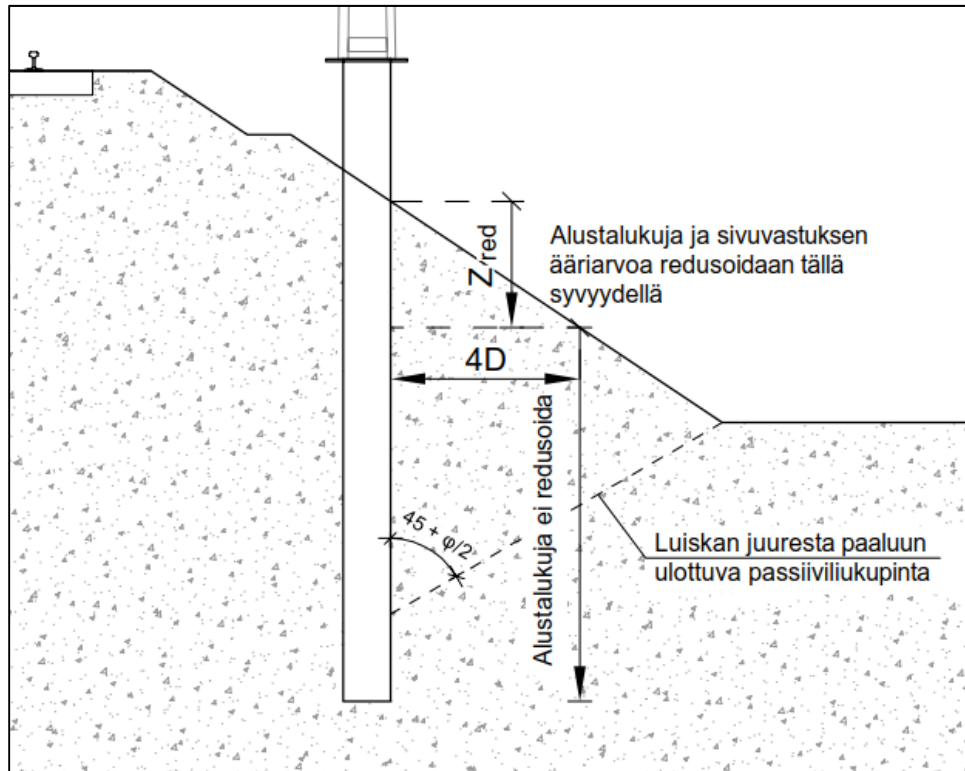
7.4.2 Luiskan vaikutus alustalukuihin ja paalun sivuvastukseen

Karkearakeinen maa

Karkearakeisessa pengerluiskassa olevaa, luiskaan päin sivukuormitettua paaluperustusta mitoitettaessa luiskan vaikutus otetaan huomioon pienentämällä alustaluvun ja sivuvastuksen suuruutta taulukossa 7.1 esitetyllä luiskan kaltevuudesta riippuvalla pienennyskertoimella. Taulukon 7.1 mukaisia pienennyskertoimia voidaan käyttää karkearakeisille maille. Kertoimien väliarvot voidaan interpoloida suoraviivaisesti. **Murtorajatilassa** luiskakerrointa sovelletaan luiskan juuresta paaluun ulottuvan passiiviliukupinnan yläpuoliselle osalle. **Käyttörajatilassa** luiskakerrointa sovelletaan syvyydelle, jolle vaakasuora etäisyys paalun ulkopinnasta luiskan pintaan on pienempi kuin 4 x paalun halkaisija (kuva 7.5). Tätä syvemmällä alustalukuina ja sivuvastuksen ääriarvona käytetään tasaisen maan arvoja.

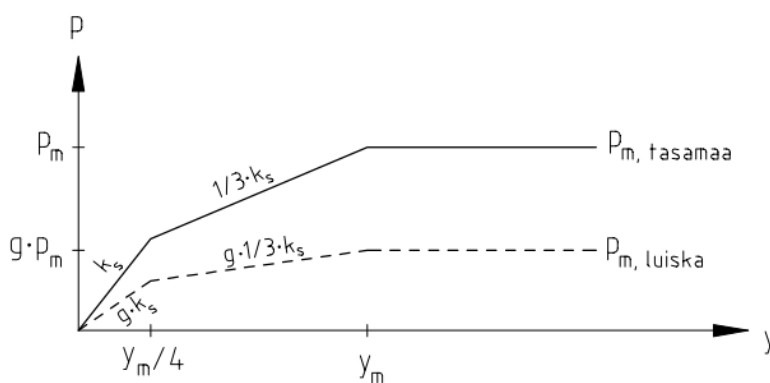
Taulukko 7.1. Kitkamaaluiskassa olevan perustuksen sivuvastuksen määrittämisessä käytettävä luiskakerroin (Kulman 2001, s. 84).

Maanpinnan kaltevuus β	Luiskakerroin g
tasamaa	1,00
1:4	0,67
1:3	0,56
1:2	0,42
1:1,5	0,33



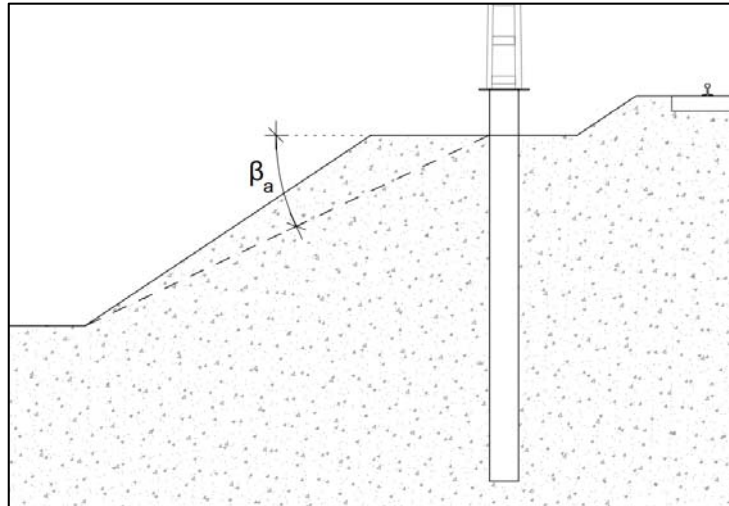
Kuva 7.5. Luiskassa olevan paaluperustuksen alustalukujen ja sivuvastuksen redusointisyvyys käyttörajatilassa tehdään kuvan mukaiselle alalle. Murtorajatilassa redusointi tehdään passiiviliukupinnan ylähuoliselle osalle.

Kuvassa 7.6 on esitetty kitkamaaluiskassa olevan paalun (katkoviiva) sivuvastuksen kehittyminen tasamaalla olevaan paaluun (yhtenäinen viiva) verrattuna. Sivuvastuskuvaajan kulmakertoimien muutoskohdat määritetään NCCI7:n mukaan (ks. myös kuva 7.1).



Kuva 7.6. Luiskassa olevan paaluperustuksen sivuvastuksen kehittyminen tasamaalla olevaan paaluun verrattuna.

Mikäli paaluperustus ei sijaitse aivan luiskassa, vaan luiskan päällä, määritetään luiskan kaltevuus β kuvan Kuva 7.7 mukaisesti.



Kuva 7.7. Mitoituksessa käytettävän luiskan kaltevuuden määrittäminen, kun paalu-perustus sijaitsee luiskan päällä.

Hienorakeinen maa

Hienorakeisessa maassa pengerluiskaa voidaan käyttää tukena sivusuuntaisia kuormia vastaan, jos penger on stabiilissa tilassa. Penkereen voidaan katsoa olevan stabiilissa tilassa, jos sen stabiliteetti täyttää NCCI7:n stabiliteetin käyttörajatilan lisätarkasteluiden korkeampien varmuustasojen vaatimukset. Tällöin luiskan osuudella voidaan käyttää sivuvastuksena 50 % tasaisen maan sivuvastuksesta.

Jos pengerluiskan stabiliteetti ei täytä NCCI7:n käyttörajatilan lisätarkastelun vaatimuksia, ei pengerluiskaa voida käyttää tukena sivukuormia vastaan, vaan vaakasuuntaiset kuormitukset on otettava esimerkiksi vinopaalujen avulla.

7.4.3 Syklisen kuorman vaikutus alustalukuihin

Syklinen eli toistuva kuormitus tiivistää maata paalun ympärillä ja muodostaa raon paalun ja maan väliin. Syklinen kuormitus lisää vaakasiirtymien suuruutta verrattuna staattiseen kuormitustilanteeseen. Syklistä kuormitusta voi esiintyä esimerkiksi radan lähellä olevilla meluseinillä junan paine- ja imukuorman vaikutuksesta.

Ohjeen RIL223-2005 *Lyöntipaalutusohje LPO-2005* mukaan syklisesti sivukuormitetun paalun tai paaluryhmän analysoinnissa voidaan karkearakeisessa maassa käyttää staattista alustalukumenetelmää, jossa käytetään taulukon 7.2 mukaan muunnettuja alustalukuja. Muunnettujen alustalukujen arvo riippuu maan suhteellisesta tiiveydestä.

Taulukko 7.2. Syklisessä kuormituksessa karkearakeisessa maassa käytettävät alustaluvun k_{ss} arvot. k_s on staattinen alustaluku (LPO-2005, s.66).

Alustaluku syklisessä kuormituksessa	Suhteellinen tiiveys D_r		
	< 0,35 (löyhä)	0,35–0,65 (keskitiivis)	> 0,65 (tiivis)
k_{ss}	0,25 k_s	0,33 k_s	0,5 k_s

Paalun yläpään kohdistuva syklinen kuormitus vaikuttaa siirtymiä kasvattavasti syvyyteen $4 \times d$ asti. Tämän syvyyden alapuolella käytetään staattisia alustalukujen arvoja.

Siltainen maa voi häiriintyä syklisen kuormituksen seurauksena. Syklisen kuorman seurauksena huokosvedenpaine voi nousta progressiivisesti eikä muodostunut ylipaine ehdi purkautua kuormitus syklien välissä. Mahdollinen maan häiriintymisherkkyys tulee ottaa huomioon perustusta mitoittaessa.

7.5 Paaluryhmä

Paaluryhmän varaan (useamman paalun perustus tai pieni paalulaatta) perustetun pylväsperustuksen mitoitus tehdään soveltaen ohjeen *Paalutusohje PO-2016* poikittaiskuormitettujen paalujen mitoitusta koskevaa osiota. Paalujen alustaluvut määritetään kohdan 7.4 mukaisesti ja paaluryhmän vaikutus alustalukuihin ja sivukuormituskestävyyteen otetaan huomioon ohjeen *Paalutusohje PO-2016* paaluryhmää käsittelevän osion mukaisesti.

8 Kokeellinen mitoitus

Kokeellisen menetelmän käyttö edellyttää alustavaa laskennallista mitoitusta. Pohjatutkimusten on oltava laadullisesti ja määrällisesti riittävät geoteknisten mitoitusarvojen luotettavaan määrittämiseen. Kokeellisessa mitoituksessa koemenetelmän on oltava luotettava. Koekuormitusohjelmalle ja koejärjestelyille on hankittava etukäteen Liikenneviraston hyväksyntä. Kokeellista mitoitusta käytetään perustuksen käyttöraja-tilamitoitukseen, murtorajatilamitoitus on tehtävä laskennallisesti.

Sähköratapylväille voidaan käyttää seuraavanlaista ohjeellista koejärjestelyä (Stenman 2005):

Rakenteen mitoitus koekuormittamalla tehdään mahdollisimman epäsuotuisissa kuormitus-, sijainti- ja pohjaolosuhteissa, mikä asettaa rajat perustuksen kohdekohtaiselle soveltuvuudelle. Mitoitus tehdään käyttörajatilassa ominaiskuormilla.

Koekuormitus tehdään vaakasuuntaisella kuormalla ajolangan tasosta. Koekuormittaminen tehdään useassa kuormitusvaiheessa. Perustuksen siirtymistä aiheutuva vaakasiirtymä ajolangan tasossa mitataan ja kirjataan jokaisen kuormitusvaiheen jälkeen.

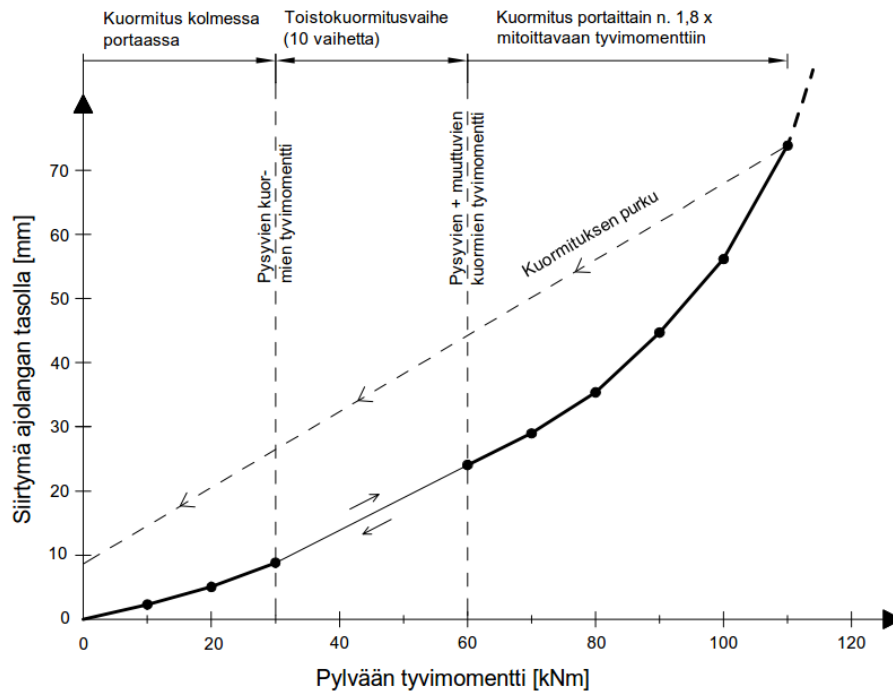
Kuormitusvaiheet ovat seuraavat (ks. myös kuva 8.1):

- 1. Kuormitus portaittain kolmessa vaiheessa suurinta pysyvää kuormitusta vastaavalle tasolle (3 mittausta).*
- 2. Tätä kuormitusta ylläpidetään, kunnes siirtymä ei enää kasva.*
- 3. Kuormitus suurinta kuormitusta vastaavalle tasolle.*
- 4. Kuormituksen vähentäminen suurinta pysyvää kuormitusta vastaavalle tasolle.*
- 5. Vaiheita 3 ja 4 toistetaan 9 kertaa (2×9 mittausta).*
- 6. Kuormitus suurinta kuormitusta vastaavalle tasolle ja kuormituksen ylläpito kunnes siirtymä ei enää kasva (1 mittaus).*
- 7. Kuormituksen kasvattaminen vaiheittain siten, että tyvimomentin osuus kuormituksesta kasvaa noin 5...10 kNm/vaihe (n. 5 mittausta). Kuormitusta kasvatetaan noin $1,8 \times$ mitoittavaan tyvimomenttiin saakka (pyritään selvittämään varmuustaso murtoa vastaan).*
- 8. Kuormituksen purku (1 mittaus).*

Vaiheiden 6 ja 2 mittaustulosten erotus kuvaa muuttuvien kuormien aiheuttamia siirtymiä ajolangan tasolla.

Kuvassa 8.1 on esitetty koekuormitusportaat kuormitustapaukselle, jossa pysyvien kuormien aiheuttama pylvään tyvimomentti on 30 kNm ja pysyvien sekä muuttuvien kuormien aiheuttama tyvimomentti on 60 kNm.

Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje



Kuva 8.1. Esimerkki sähköratapylvään koekuormitusportaistuksesta.

Tilaaajalle tulee toimittaa koekuormitusohjelma tarkastusta varten ennen koekuormituksen suorittamista. Koekuormitusohjelmasta tulee ilmetä seuraavat asiat:

- Koekuormitusjärjestelyjen kuvaus (kuinka kuormitetaan ja kuinka mitataan)
- Työselitys koekuormituksesta mukaan lukien perustuksen asentamisen ja koekuormituksen aikataulu
- Perustuksen pohjarakenne- ja rakennepiirustukset

Koekuormitukset saa tehdä vain tilaajan hyväksymä riittävän osaamisen omaava taho (sertifioitu tai tilaajan hyväksymä koestuslaitos).

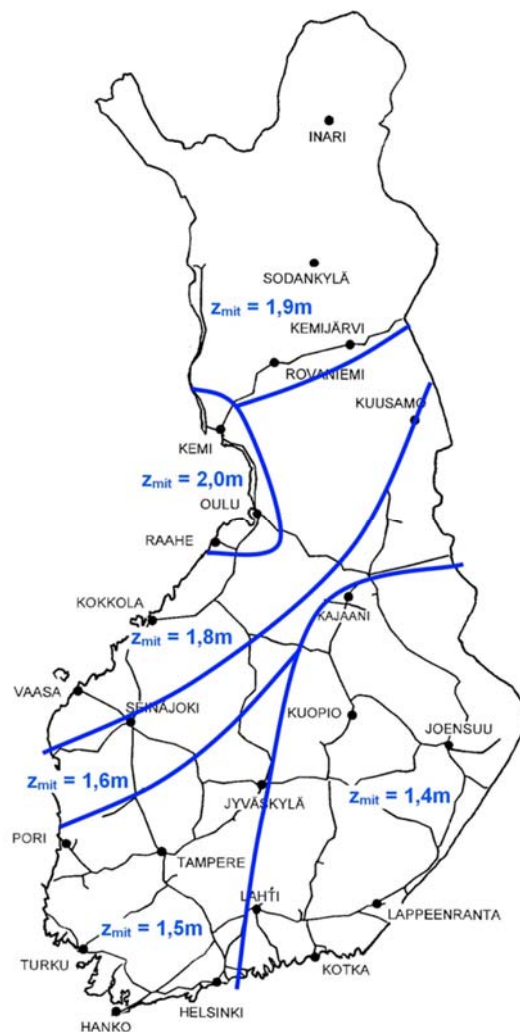
Koekuormituksen tuloksista laaditaan yhteenveto, jossa osoitetaan perustuksen täytävän sille asetetut toiminnalliset vaatimukset sekä taulukon 2.3 siirtymien raja-arvot.

9 Routasuojaus

9.1 Maanvarainen antura- tai pilariperustus

9.1.1 Routasyvyyden määrittäminen ja mitoittava pakkasmäärä

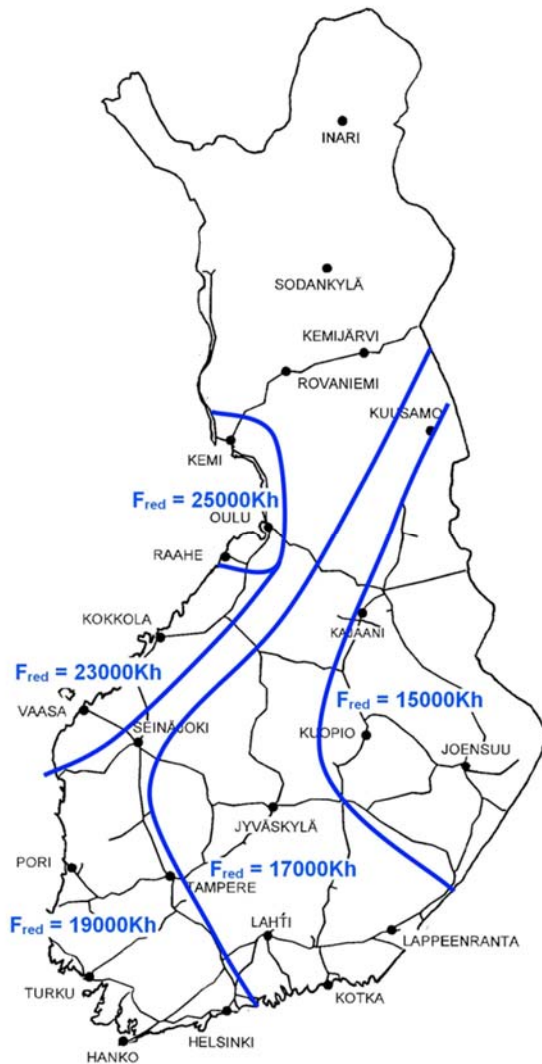
Pylväasperustuksien suunnittelussa roudan tunkeutumissyvyys määritetään käyttämällä kuvassa 9.1 esitettyjä roudan tunkeutumissyvyyden arvoja lumen suojaamalla alueella tavanomaisissa olosuhteissa. Tavanomaisten olosuhteiden oletetaan toteutuvan rautatiealueella avoimentilan ulottuman (ATU) suurimman vaakaetäisyyden ulkopuolella tai tiealueella vähintään 2,0 m etäisyydellä tienreunasta.



Kuva 9.1. Pylväasperustuksien suunnittelussa käytettävä roudan tunkeutumissyvyys tavanomaisissa olosuhteissa lumen suojaamalla alueilla.

Kuvassa 9.1 esitetyt arvot perustuvat kerran 50 vuodessa toistuva pakkasmäärään (F₅₀) ja keskimääräiseen lumen paksuuteen, joiden perusteella on määritetty redusoitu pakkasmäärä (F_{red}) tavanomaisissa olosuhteissa. Lumen roudan tunkeutumisesta rajoittava vaikutusta ei voida huomioida, jos perustus sijaitsee alueella, josta lumi aurataan tai pylvään perustuksen kohdalle ei voi lunta kertyä.

Routasuojauksista suunniteltaessa on mitoittava pakkasmäärä (F_{red}) määritetään kuvan 9.2 mukainen



Kuva 9.2. Pylväasperustuksen suunnittelussa käytettävä mitoittava pakkasmäärä F_{red} ($h^{\circ}C$) lumen suojaamilla alueilla.

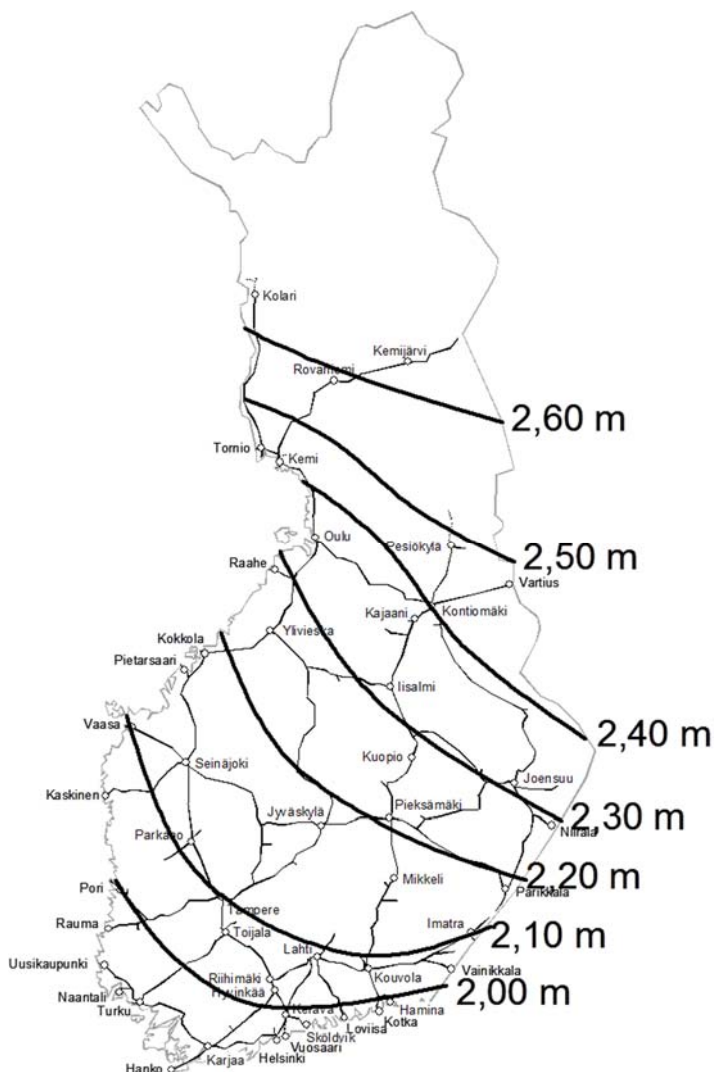
Tavanomaisesta poikkeavat olosuhteet:

Tavanomaisesta poikkeavissa olosuhteissa lumen roudan tunkeutumista rajoittava vaikutusta ei voida huomioida. Tällainen tilanne muodostuu esimerkiksi, jos perustus sijaitsee alueella, josta lumi aurataan tai pylvään perustuksen kohdalle ei voi lunta kertyä. Lumen suojaavaa vaikutusta ei voida huomioida. Lumensuojaavan vaikutuksen ei voida olettaa toetutuvan, jos perustus sijaitsee rautatiealueella avoimentilan ulottuman (ATU) sisäpuolella ulkopuolella tai tiealueella alle 2,0 m etäisyydellä tien reunasta.

Hankkeessa voidaan myös määrittää noudatettavaksi vaatimus, että lumen suojaavaa vaikutusta ei huomioida.

Sivukuormitettujen pylväspäristusten suunnitteluohje

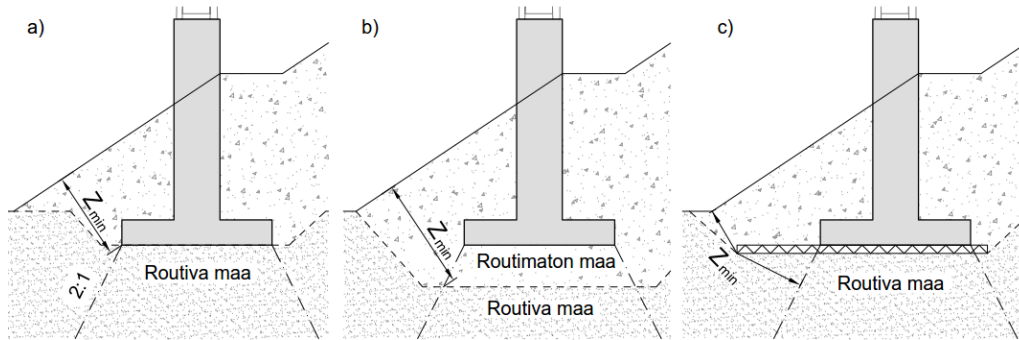
Perustuksia, joita lumen ei voida olettaa suojaavan, roudan oletetaan tukeutuvan kuvassa 9.3 esitettyyn syvyyteen. Mahdollisen routasuojauksen mitoituksessa käytetään tällöin vähintään kuvassa 9.4 esitettyä mitoituspakkasmäärää, joka vastaa kerran 50 vuodessa toistuvaa pakkasmäärää F50 (h°C).



Kuva 9.3 Roudan mitoitusunkeutumasyyvyys pylväspäristuksille lumettomilla alueilla (LO 6/2016)

9.1.2 Maanvaraisen anturallisen perustuksen routasuojaus

Pylväspäristusten mitoituksessa otetaan huomioon roudan vaikutus. Routivalla pohjamaalla maanvaraiset anturalliset perustukset on mitoitettava siten, että routa ei tunkeudu maahan anturan alareunasta kaltevuudessa 2:1 laajenevien tasopintojen rajaaman alueen sisäpuolelle (kuva 9.4). Routasuojaus voidaan toteuttaa joko viemällä perustukset roudattomaan syvyyteen, vaihtamalla routivat maamassat routimattomaksi perustuksen alla tai käyttämällä routaeristettyä rakennetta.



Kuva 9.4. Perustuksen routasyvyyden määrittäminen: a) routatonta perustussyvyys, b) routimaton massanvaihto, c) routaeristetty rakenne.

Roudan tunkeutumisvyvyys määritetään kuvan 9.3 mukaan. Pylväsperustusten lämmönerityksen mitoitus tehdään käyttäen kerran 50 vuodessa toistuvaa suurinta pakkasmäärä (F_{50}) soveltaen ohjetta RIL 261–2013 *Routasuojaus – rakennukset ja infra-rakenteet*.

9.2 Paaluperustuksen routasuojaus

Paaluperustukset suunnitellaan siten, että maa ei roudi paalun välittömässä läheisyydessä. Lievästi routivilla mailla putkipaaluperustusten routasuojaus tehdään tekemällä paalun ympärille 1 m etäisyydelle ja syvyydelle ulottuva massanvaihto routimattomasta maasta. Vaihtoehtoisesti perustus voidaan routaeristää.

Jos routasuojaus tehdään massanvaihtoa käyttäen, on täytön tiivistämiseen kiinnitettävä erityistä huomiota. Etenkin paalun yläosassa olevan maan tiiveys vaikuttaa sivukuormitetun paaluperustuksen toimintaan merkittävästi, joten täyttö paalun yläosassa tulee tiivistää perustusten alustäytön vaatimusten mukaisesti.

Voimakkaasti routivilla mailla paaluperustukset tehdään routaeristettyinä rakenteina.

9.3 Liittyvien rakenteiden routasuojaus

Meluosteilla meluesteen sokkelin routasuojaus lievästi routivilla mailla tehdään vaihtamalla vähintään 0,8 m paksu kerros routimatonta materiaalia sokkelin alle. Voimakkaasti routivilla mailla massanvaihto tehdään kuvan 9.1 mukaiseen syvyyteen tai rakenne routasuojataan.

10 Suunnitelman sisältö

10.1 Geotekninen suunnitteluraportti

Pylväsperustusten suunnitelmaan täytyy laatia geotekninen suunnitteluraportti. Suunnitteluraportissa on esitettävä selvitys pohjaolosuhteista ja perustamistavasta. Suunnitteluraporttiin on aina laadittava laskelmaselostus.

10.1.1 Pohjaolosuhdeselvitykset ja perustamistapalausunto

Pohjaolosuhdeselvityksissä esitetään pohjatutkimuksiin liittyvät havainnot pohjaosuhteista ja perustamiseen vaikuttavista asioista. Perustamistapalausunnossa täytyy esittää perustusten suunnitteluun vaikuttavat tekijät, joita ovat mm.:

- kuvaus pohjasuhteista
- rakenteen geotekninen luokitus
- rakenteiden perustamistavat
- selvitys pohjarakentamisesta aiheutuvista ympäristövaikutuksista ja tarvittavista suojaustoimenpiteistä

Pohjasuhteet kuvataan maakerroksittain maanpinnasta alaspäin. Maakerroksista esitetään käytetyt geotekniset suunnitteluarvot suunnittelun edellyttämässä laajuudessa.

10.1.2 Laskelmaselostus

Pylväsperustusten suunnitelmista on aina laadittava laskelmat. Laskelmat tulee laatia hyvää laskentatapaa noudattaen ja niiden on oltava systemaattisia ja niin selkeitä, että ulkopuolinen asiantunteva henkilö voi tarkastaa ne helposti.

Laskelmissa tulee esittää:

- lähtötiedot
- käytetyt maaparametrit perusteluineen
- laskentamalli ja laskentaolettamukset
- laskentatulokset
- vaatimusten täyttyminen
- yhteenveto keskeisistä tuloksista

Laskelmat toimitetaan tarvittaessa tilaajalle tarkastusta varten. Mikäli käytettävät perustustyytit tai olosuhteet ovat tavanomaisesta poikkeavat, tulee laskelmien lähtökohdat sopia tilaajan kanssa etukäteen.

10.2 Piirustukset

Pylväsperustuksen piirustuksiin sisältyvät geotekniset piirustukset, mittapiirustukset ja raudituspiirustukset.

Geoteknisissä piirustuksissa pohjatutkimustulokset esitetään karttoina ja leikkauspiirustuksina. Pohjatutkimustulokset esitetään julkaisussa *Pohjatutkimusmerkinnät, Rakennustietietä SGY 201* esitettyjä merkintöjä käyttäen. Geoteknisissä piirustuksista tutkimusten luotettavuus ja riittävyys sekä tehdyt pohjasuhteiden yleistyksiset on oltava

yksikäsitteisesti arvioitavissa ja ymmärrettävissä. Piirustuksista on selkeästi käytävä ilmi rakennuskohteen pohjasuhteet sekä muut pohjarakentamiseen vaikuttavat maasto- ja ympäristötekijät.

Perustuksen geoteknisissä piirustuksissa esitetään mm.:

- pohjatutkimuskartta ja geotekniset leikkaukset (rataympäristössä myös rata-poikkileikkaus), joissa esitetään
 - o pohjatutkimukset
 - o maakerrokset ja niiden ominaisuudet
 - o perustuksen sijainti
 - o mahdollinen routasuojaus
- risteävät rakenteet, putkilinjat ja johdot
- olemassa olevat rakenteet

Pylväsperustuksen suunnitelmassa esitetään perustuksen mitta- ja raudoituspiirustukset tarpeellisine leikkauspiirustuksineen. Piirustusten mittakaava valitaan kohteen mukaan niin, että piirustukset ovat selkeästi tulkittavissa.

Perustuksen mittapiirustuksessa esitetään mm.:

- perustuksen mitat
- tarvittavat detaljipiirustukset
- perustuksen sijainnin määrittämistä varten perustuksen koordinaatit (x, y ja z), sähköratapylväillä koordinaatit voidaan esittää pylväsluettelossa
- käytettävä koordinaatti- ja korkeusjärjestelmä
- geotekninen luokka
- perustuksen suunniteltu käyttöikä
- paaluperustuksilla paalutustyöluokka
- perustuksen mitta- ja asennustoleranssit
- perustuksen materiaali ja materiaalivaatimukset
- perustuksen mitoituksessa käytetyt kuormitukset (pylvään tyvikuormat)
- tyyppiperustuksiksi suunnitelluilla perustuksilla perustuksen käyttöalue (max. pylvään tyvikuormitus, perustamissyvyys, luiskan kaltevuus, pohjaolosuhteet)

Pylväsperustuksen raudoituspiirustuksissa esitetään mm.:

- raudoitusterästen sijoitus
- tarvittavat detaljikuvat
 - o esim. ylärakenteen kiinnityspulttien asennus
 - o asennustoleranssit
 - o maadoitus sähköratapylväillä
- betoniteräsluettelo
 - o erimuotoiset raudoiteteräokset tunnuksineen
 - o kappalemäärä
 - o läpimitta, pituus, taivutusten pituus

Yllä esitetyt listaukset ovat ohjeellisia eivätkä kaiken kattavia. Yllä esitettyjen listauksen lisäksi piirustuksien laadinnassa täytyy ottaa huomioon myös ohjeessa *Ratatekni-set piirustusohjeet* esitetyt ohjeet ja vaatimukset piirustuksille. Lisäksi muut perustuksen rakentamisen, asentamisen tai toiminnan kannalta merkittävät asiat täytyy esittää piirustuksissa.

10.3 Laatuvaatimukset ja työselostukset

Perustusten rakentamisesta on aina laadittava työkohtainen työselostus ja laatuvaatimukset. Työselostukset ja laatuvaatimukset tehdään InfraRYL-nimikkeistöä käyttäen.

Ratapylväasperustusten yleinen työselostus on esitetty RMYTL:n osassa 9 Pylväasperustukset. Yleisessä työselostuksessa esitetään rautateiden maanvaraisten pylväasperustusten perustamistöiden, laatuvaatimusten ja laadunvarmistuksen yleiset periaatteet.

Työselostukset ja laatuvaatimukset on hyväksyttävä tilaajalla.

Kirjallisuusluettelo

Kulmala, H. Kaltevan maanpinnan vaikutus perustusten kantokykyyn. Diplomityö. Tampereen Teknillinen korkeakoulu. Tampere 1994

Kulman, M. Rautateiden maanvaraiset pylväasperustukset. Licensiaatintutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto. Tampere 2001

Liikennevirasto. Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, Liikenneviraston ohjeita 10/2015

Liikennevirasto. Liikennemerkkien rakenne ja pystytys, Liikenneviraston ohjeita 20/2013

Liikennevirasto. Ratatekniset ohjeet (RATO) Osa 2 Radan geometria, Liikenneviraston ohjeita 3/2010

Liikennevirasto. Ratatekniset ohjeet (RATO) Osa 3 Radan rakenne, Liikenneviraston ohjeita LO 6/2016

Liikennevirasto. Ratatekniset ohjeet (RATO) Osa 5 Sähköistetty rata, Liikenneviraston ohjeita 21/2013

Liikennevirasto. Rakennustuotteiden CE-merkintä, 2015

Liikennevirasto. Sillan geotekninen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 11/2012

Liikennevirasto. Tien geotekninen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 10/2012

Liikennevirasto. Tien melusteiden suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 21/2015

Liikennevirasto. Tiepenkereiden ja -leikkausten suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 9/2010

Pohjatutkimusmerkinnät, Rakennustietieto SGY 201

Poulos, H. G. and Davis, E. H., Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics, John Wiley and Sons. New York 1974

Rakennustieto Oy, Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset InfraRYL.

Ratahallintokeskus. Ratatekniset määräykset ja ohjeet RAMO, osa 13 Radan tarkastus

Ratahallintokeskus. Rautateiden maarakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset (RMYTL) osa 9 Pylväasperustukset, Ratahallintokeskuksen julkaisuja D 10/2001

Ratahallintokeskus. Rautateiden melusteet, Ratahallintokeskuksen julkaisuja B 11/2004

Stenman, M. Grundläggningsmetoder för kontaktledningsfundament. Examensarbete. Luleå tekniska universitetet. Luleå 2005

Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. RIL 254-2016 Paalutusohje PO-2016. RIL ry. Helsinki 2016

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. RIL 261-2013 Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet. RIL ry. Helsinki 2013

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. RIL 263-2014 Kaivanto-ohje. RIL ry. Helsinki 2014

Laskuesimerkki 1. Maanvarainen anturallinen ratapylväsperustus

1. LÄHTÖTIEDOT

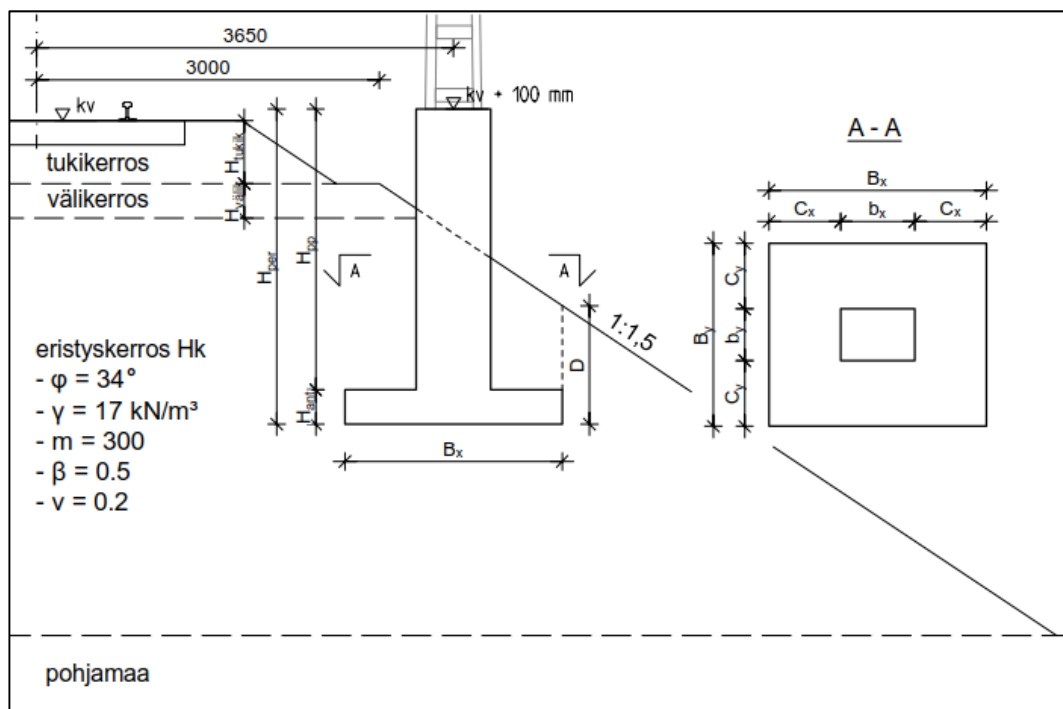
1.1 YLEISTÄ

Mitoitettava perustus on I-pylvään perustus. Ratapenger on vanha penger, poikkileikkaus on Jk-1-PB-6,0 (RATO 3, liite 2/6).

Penkereen korkeus on perustuksen kohdalla 4,5 m. Pohjatutkimusten perusteella ratapenkereen materiaali on keskitiivistä, keskirakeista hiekkaa. Penkereen luiskankaltevuus on 1:1,5.

Rakenteen geotekninen luokka on GL2 ja seuraamusluokka CC2. Perustuksen suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta.

Pylvään keskilinjän etäisyys radan keskilinjasta on 3,65 m.



Kuva. Laskettavan perustuksen ja ratapenkereen mitat ja ominaisuudet

1.2 YLÄRAKENTEEN KUORMITUSTIEDOT

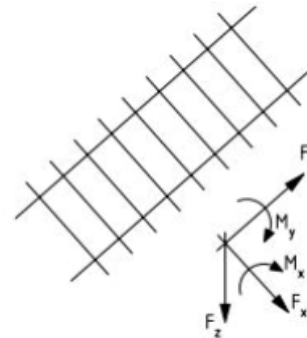
Sähköratasuunnittelijalta saadut ylärakenteelta perustukselle tulevat kuormitukset, kuormitusten sijainti perustuksen ja pilarin liitoskohdassa.

	$M_{g,y}$ [kNm]	$M_{q,y}$ [kNm]	$F_{g,x}$ [kN]	$F_{q,x}$ [kN]	$M_{g,x}$ [kNm]	$M_{q,x}$ [kNm]	$F_{g,y}$ [kN]	$F_{q,y}$ [kN]	$F_{g,z}$ [kN]	$F_{q,z}$ [kN]
⊥	15	20	2,5	3,2	0	0	0	0	10	0
	15	0	2,5	0	0	13	0	2,1	10	0

Laskettava kuormitustapaus rataa vastaan kohtisuora suunta

Kuormien suunnat:

$F_{g,z} := 10 \cdot \text{kN}$	Pysyvä pystykuorma
$F_{q,z} := 0 \cdot \text{kN}$	Muuttuva pystykuorma
$F_{g,x} := 4.1 \cdot \text{kN}$	Pysyvä vaakakuorma (luiskaan päin)
$F_{q,x} := 3.2 \cdot \text{kN}$	Muuttuva vaakakuorma (luiskaan päin)
$M_{g,y} := 15 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	Pysyvä taivutusmomentti (luiskaan päin taivuttava)
$M_{q,y} := 20 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	Muuttuva taivutusmomentti (luiskaan päin taivuttava)
$F_{g,y} := 0 \cdot \text{kN}$	Pysyvä vaakakuorma (radan suunnassa)
$F_{q,y} := 0 \cdot \text{kN}$	Muuttuva vaakakuorma (radan suunnassa)
$M_{g,x} := 0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	Pysyvä taivutusmomentti (radan suunnassa taivuttava)
$M_{q,x} := 0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	Muuttuva taivutusmomentti (radan suunnassa taivuttava)



Esimerkissä laskettavassa kuormitustapauksessa kuormituksen pääsuunta on rataa vastaan kohtisuora suunta (x-suunta) ja kuormitus tapahtuu pengertuiskaan päin.

1.3 RATAPENKEREEN OMINAISUUDET

Ratapenger on keskitiivistä, keskirakeista hiekkaa. Penkereen lujuus- ja muodonmuutosparametrit taulukosta 2.1.

$K := \frac{1}{1.5}$	Penkereen luiskan kaltevuus ($K=0$, jos tasamaa)
$\beta := \text{atan}(K) = 33.69^\circ$	Luiskan kaltevuus asteina
$g_{\text{luiska}} := 0.23$	Luiskan kaltevuudesta johtuva kantokestävyyden pienennyskerroin (taulukko 5.1)
$h_{\text{tukik}} := 0.55 \text{ m}$	Tukikerroksen korkeus
$b_{\text{jät}} := 3.0 \text{ m}$	Jätkepolun reunan etäisyys radan keskiliinjasta (luiskan alkamisetäisyys)

Välikerroksen materiaaliparameterina käytetään laskennassa ratapenkereen parametreja

Lujuus- ja muodonmuutosparametrit (taulukko 2.1)

$\phi_{yp} := 34 \cdot \text{deg}$	Tehokas leikkauskestävyysskulma perustamistason yläpuolella
$\phi_{ap} := 34 \cdot \text{deg}$	Tehokas leikkauskestävyysskulma perustamistason alapuolella
$\gamma_{yp} := 17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Tehokas tilavuuspaino perustamistason yläpuolella
$\gamma_{ap} := 17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Tehokas tilavuuspaino perustamistason alapuolella (perustus sijaitsee penkereessä, pohjavesi syvällä)
$c_t := 0 \text{ kPa}$	Perustuksen alapuolisen maan tehokas koheesio
$\gamma_{\text{tukik}} := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Tukikerroksen tehokas tilavuuspaino
$m_{\text{penger}} := 300$	Ratapengermateriaalin moduuliluku
$\beta_{\text{penger}} := 0.5$	Ratapengermateriaalin jännitysekspONENTTI
$\nu := 0.2$	Ratapengermateriaalin Poissonin luku

Maanpainekertoimet

$K_0 := (1 - \sin(\phi_{yp})) = 0.441$	Lepopainekerroin tasaiselle maanpinnalle
--	--

1.4 KUORMIEN YHDISTELY JA OSAVARMUUSLUVUT

$K_{FI} := 1.0$	Seuraamusluokasta riippuva kuormakerroin
$\gamma_G := 1.3$	Epäedullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku, RATO 5 kohta 5.7.3.2
$\gamma_{G.stb} := 1.0$	Edullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku, RATO 5 kohta 5.7.3.2
$\gamma_Q := 1.3$	Epäedullisen muuttuvan kuorman osavarmuusluku, RATO 5 kohta 5.7.3.2
$\gamma_{Q.stb} := 0$	Edullisen muuttuvan kuorman osavarmuusluku, RATO 5 kohta 5.7.3.2
$\gamma_{Rh} := 1.1$	Liukumiskestävyys osavarmuusluku (NCCI7)
$\gamma_{R.v} := 1.55$	Kantokestävyys osavarmuusluku (NCCI7)

1.5 PERUSTUKSEN TIEDOT

Laskennassa etsitään sopivat perustuksen mitat, jotta kantokestävyys ja liukumiskestävyys mitoitus ehdot täyttyvät.

$B_x := 1.9\text{m}$	Anturan pituus (sivumitta kohtisuoraan rataa vasten)
$B_y := 1.6\text{m}$	Anturan leveys (sivumitta radan suunnassa)
$b_x := 0.65\text{m}$	Peruspilarin pituus (sivumitta kohtisuoraan rataa vasten)
$b_y := 0.45\text{m}$	Peruspilarin leveys (sivumitta radan suunnassa)
$H_{per} := 2.75\text{m}$	Perustuksen korkeus (anturan alareunasta peruspilarin yläpäähän)
$H_{ant} := 0.3\text{m}$	Anturan korkeus
$\gamma_{bet} := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$	Betonin tilavuuspaino
$\alpha := 0$	Perustuksen pohjan kaltevuus
$H_{pp} := H_{per} - H_{ant} = 2.45\text{m}$	Peruspilarin korkeus
$b_{pylväs} := 3.65\text{m}$	Pylvään keskiliinjan etäisyys radan keskiliinjasta
$H_{kv} := 0.1\text{m}$	Perustuksen yläreunan korkeus radan korkeusviivasta

Apumittoja laskentaan ja perustamissyvyys

$h_0 := [h_{tukik} + 0.1\text{m} + (b_{pylväs} - b_{jät}) \cdot K] = 1.083\text{m}$	Peruspilarin yläpään etäisyys maanpinnasta peruspilarin keskellä.
$D_{kesk} := H_{per} - h_0 = 1.667\text{m}$	Perustuksen maanpinnan alapuolella olevan osan korkeus perustuksen keskellä (pylvään keskiliinjalla)
$C_x := \frac{B_x - b_x}{2} = 0.625\text{m}$	Anturan reunan ja pilarin välinen etäisyys rataa vastaan kohtisuorassa suunnassa
$C_y := \frac{B_y - b_y}{2} = 0.575\text{m}$	Anturan reunan ja pilarin välinen etäisyys radan suunnassa
$D_{välik} := H_{per} - H_{kv} - h_{tukik} = 2.1\text{m}$	Välikerroksen yläpinnan etäisyys perustamistasosta
$h_1 := \min \left[D_{kesk} + K \cdot \left(\frac{b_x}{2} + \frac{C_x}{2} \right) - H_{ant}, D_{välik} - H_{ant} \right] = 1.792\text{m}$	Perustuksen yläpuolella olevan maakaistaleen eskim. korkeus yläluiskan puolella
$h_2 := D_{kesk} - K \cdot \left(\frac{b_x}{2} + \frac{C_x}{2} \right) = 1.24\text{m}$	Perustuksen yläpuolella olevan maakaistaleen eskim. korkeus alaluiskan puolella
$D := D_{kesk} - K \cdot \left(\frac{b_x}{2} + C_x \right) = 1.033\text{m}$	Perustamissyvyys

2. GEOTEKNISET KUORMITUKSET**2.1 RAKENTEIDEN PAINOT****Perustuksen paino**

$$G_{pp} := H_{pp} \cdot b_x \cdot b_y \cdot \gamma_{bet} = 17.916 \cdot \text{kN} \quad \text{Peruspilarin paino}$$

$$G_{ant} := B_x \cdot B_y \cdot H_{ant} \cdot \gamma_{bet} = 22.8 \cdot \text{kN} \quad \text{Anturalaatan paino}$$

$$G_{per} := G_{ant} + G_{pp} = 40.716 \cdot \text{kN} \quad \text{Perustuksen paino}$$

2.2 MAAN PAINOT JA MAANPAINEET**Perustuksen päällä olevien maamassojen painot ja epäkeskisyydet:**

Anturan päällä olevien maiden paino ja epäkeskisyydet, peruspilarin yläluiskan puoli

$$G_1 := h_1 \cdot B_y \cdot C_x \cdot \gamma_{yp} = 30.458 \cdot \text{kN} \quad e_{1,x} := \frac{b_x + C_x}{2} = 0.638 \text{ m}$$

Anturan päällä olevien maiden paino ja epäkeskisyydet, peruspilarin alaluiskan puoli

$$G_2 := h_2 \cdot B_y \cdot C_x \cdot \gamma_{yp} = 21.108 \cdot \text{kN} \quad e_{2,x} := \frac{b_x + C_x}{2} = 0.638 \text{ m}$$

$$G_3 := D_{kesk} \cdot b_x \cdot 2C_y \cdot \gamma_{yp} = 21.179 \cdot \text{kN} \quad \text{Peruspilarin kohdalla olevien maiden paino}$$

$$G_{maa} := G_1 + G_2 + G_3 = 72.746 \cdot \text{kN} \quad \text{Maiden paino yhteensä}$$

$$G_{tot,k} := G_{per} + G_{maa} = 113.461 \cdot \text{kN} \quad \text{Perustuksen ja perustuksen päällä olevien maiden paino}$$

Perustusta kuormittavat maanpaineet:

Penkereen aiheuttaman kolmiomaisen maanpaine kuorman intensiteetti perustamistasossa (suunnitteluohje, kuva 3.1), Välikerroksen parametreina käytetään ratapenkereen parametreja.

$$p_{g,penker} := K_0 \cdot \gamma_{yp} \cdot (h_1 + H_{ant}) = 15.674 \cdot \text{kPa}$$

Tukikerroksen painosta aiheutuva tasainen maanpaine kuorma. Laskennassa tukikerroksen aiheuttama kuormitus otetaan huomioon tasaisena kuormana maan pinnalla.

$$p_{g,tukik} := K_0 \cdot \gamma_{tukik} \cdot h_{tukik} = 4.849 \cdot \text{kPa}$$

Perustusta tukevat maanpaineet:

$$h_{pp_luiska} := D_{kesk} - K \cdot \left(\frac{b_x}{2} \right) = 1.45 \text{ m} \quad \text{Maanpinnan korkeus perustamistasosta peruspilarin luiskan puolella}$$

$$Z_{red} := K \cdot 4 \cdot b_y = 1.2 \text{ m} \quad \text{Luiskan puoleisen tukevan maanpaineen redusointisyvyys } Z_{red}$$

$$k_{luiska} := 0.33 \quad \text{Taulukon 3.1 mukainen luiskan puoleisen tukevan maanpaineen redusointikerroin}$$

Luiskan mukaan redusoitu maanpaineen intensiteetti luiskan puolella syvyydellä Z_{red}

$$p_{g,luiska_red} := k_{luiska} \cdot K_0 \cdot \gamma_{yp} \cdot Z_{red} = 2.968 \cdot \text{kPa}$$

Redusoimaton maanpaineen intensiteetti luiskan puolella syvyydellä Z_{red}

$$p_{g,luiska_Zred} := K_0 \cdot \gamma_{yp} \cdot Z_{red} = 8.992 \cdot \text{kPa}$$

Peruspilarin luiskan puolella vaikuttavan redusoidun maanpaineen intensiteetti perustamistasossa.

$$p_{g,luiska_max} := K_0 \cdot \gamma_{yp} \cdot h_{pp_luiska} = 10.866 \cdot \text{kPa}$$

2.3 RASITUKSET ANTURAN ALAPINNASSA

Maan painon ja maan paineen aiheuttamat rasitukset:

Perustuksen päällä olevien maiden epäkeskisyyden aiheuttamat momentit (-merkki on tukevaa eli penkereeseen kaatavaa, +merkki on luiskaan päin kaatavaa).

$$M_{g,maa} := -G_1 \cdot e_{1,x} + G_2 \cdot e_{2,x} = -5.961 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$P_{g,penger} := \frac{1}{2} p_{g,penger} \cdot b_y \cdot (h_1 + H_{ant}) = 7.377 \cdot \text{kN} \quad \text{Penkereen maanpaineen (lepopaine) resultantti}$$

$$M_{g,penger} := P_{g,penger} \cdot \frac{1}{3} (h_1 + H_{ant}) = 5.143 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{Penkereen maanpaineen aiheuttama momentti perustamistasossa}$$

$$P_{g,tukik} := p_{g,tukik} \cdot b_y \cdot (h_1 + H_{ant}) = 4.564 \cdot \text{kN} \quad \text{Tukikerroksen maanpaineen resultantti}$$

$$M_{g,tukik} := P_{g,tukik} \cdot \frac{h_1 + H_{ant}}{2} = 4.773 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{Tukikerroksen maanpaineen aiheuttama momentti perustamistasossa}$$

$$P_{g,luiska} = -1.918 \cdot \text{kN} \quad \text{Luiskan puoleisen maanpaineen resultantti}$$

$$M_{g,luiska} = -0.656 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{Luiskan puoleisen maanpaineen aiheuttama momentti perustamistasossa}$$

3. KUORMIEN YHDISTELY

Perustuksen geoteknisessä mitoituksessa tarvittavat kuormitukset ja kuormitusyhdistelmät:

Kokonaispystykuorma anturan alapinnassa

$$V_k := F_{g,z} + F_{q,z} + G_{per} + G_{maa} = 123.461 \cdot \text{kN} \quad \text{Pystykuorman ominaisarvo}$$

$$V_d := K_{FI} [\gamma_G (F_{g,z} + G_{per} + G_{maa}) + \gamma_Q \cdot F_{q,z}] = 160.5 \cdot \text{kN} \quad \text{Pystykuorman mitoitusarvo, tätä verrataan kantokestävyyden mitoitusarvoon}$$

Kokonaisvaakakuorma anturan alapinnassa, x-suunta eli rataa vastaan kohtisuora suunta

$$H_{x,k} := F_{g,x} + F_{q,x} + P_{g,penger} + P_{g,tukik} + P_{g,luiska} = 17.322 \cdot \text{kN} \quad \text{Vaakakuorman ominaisarvo}$$

$$H_{x,d} := K_{FI} [\gamma_G (F_{g,x} + P_{g,penger} + P_{g,tukik} + P_{g,luiska}) + \gamma_Q \cdot F_{q,x}] = 22.519 \cdot \text{kN} \quad \text{Vaakakuorman mitoitusarvo}$$

Kokonaisvaakakuorma anturan alapinnassa, y-suunta eli radan suunta

$$H_{y,k} := F_{g,y} + F_{q,y} = 0 \cdot \text{kN} \quad \text{Vaakakuorman ominaisarvo}$$

$$H_{y,d} := K_{FI} (\gamma_G F_{g,y} + \gamma_Q \cdot F_{q,y}) = 0 \cdot \text{kN} \quad \text{Vaakakuorman mitoitusarvo}$$

Vaakakuorman resultantti

$$H_{tot,k} := \sqrt{(H_{x,k}^2 + H_{y,k}^2)} = 17.322 \cdot \text{kN} \quad \text{Vaakakuorman resultantin ominaisarvo}$$

$$H_{tot,d} := \sqrt{(H_{x,d}^2 + H_{y,d}^2)} = 22.519 \cdot \text{kN} \quad \text{Vaakakuorman resultantin mitoitusarvo}$$

Perustamistasossa vaikuttava momentti (y-akselin ympäri eli rataa vastaan kohtisuoraan tapahtuva taivutus)

$$M_{y,tot,k} := M_{g,y} + F_{g,x} \cdot H_{per} + M_{g,penger} + M_{g,tukik} + M_{g,luiska} + M_{g,maa} + M_{q,y} + F_{q,x} \cdot H_{per} = 58.4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{y,tot,d} := K_{FI} [\gamma_G (M_{g,y} + F_{g,x} \cdot H_{per} + M_{g,penger} + M_{g,tukik} + M_{g,luiska} + M_{g,maa}) + \gamma_Q (M_{q,y} + F_{q,x} \cdot H_{per})] = 76.4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Perustamistasossa vaikuttava momentti (x-akselin ympäri eli radan suunnassa tapahtuva taivutus)

$$M_{x,tot,k} := M_{g,x} + F_{g,y} \cdot H_{per} + F_{q,y} \cdot H_{per} = 0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{x,tot,d} := K_{FI} [\gamma_G (M_{g,x} + F_{g,y} \cdot H_{per}) + \gamma_Q (F_{q,y} \cdot H_{per})] = 0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

4. PERUSTUKSEN KANTOKESTÄVYYS DA2*-MENETELMÄLLÄ**4.1 KUORMAN EPÄKESKISYYS JA PERUSTUKSEN TOIMIVA KOKO**

$$e_x := \frac{M_{y,tot.k}}{V_k} = 0.473 \text{ m}$$

Kuormituksen epäkeskisyys x-suunnassa
(rataa vastaan kohtisuorassa suunnassa)

$$e_y := \frac{M_{x,tot.k}}{V_k} = 0$$

Kuormituksen epäkeskisyys x-suunnassa
(rataa vastaan kohtisuorassa suunnassa)

$$\frac{B_x}{3} = 0.633 \text{ m } e_x < \frac{B_x}{3} = 1 \quad \frac{B_y}{3} = 0.533 \text{ m } e_y < \frac{B_y}{3} = 1 \quad \text{Epäkeskisyyden täytyy täyttää ehto } e < B/3, \text{ jotta DA2*-menetelmää voidaan käyttää}$$

Anturan teholliset mitat

$$B_{x,t} := B_x - 2 \cdot |e_x| = 0.954 \text{ m}$$

Tehokas leveys x-suunnassa

$$B_{y,t} := B_y - 2 \cdot |e_y| = 1.6 \text{ m}$$

Tehokas leveys y-suunnassa

$$A_t := B_{x,t} \cdot B_{y,t} = 1.527 \text{ m}^2$$

Tehokas pinta-ala

4.2 KANTAVUUSKAAVAN PARAMETRIT

Kantokestävyytlaskennassa käytettävät sivumitat

$$B' := B_{x,t} = 0.954 \text{ m}$$

Tarkastelusuunta x-suunta => $B' = B_{x,t}$

$$L' := B_{y,t} = 1.6 \text{ m}$$

Tarkastelusuunta x-suunta => $L' = B_{y,t}$

$$\phi_t := \phi_{ap} = 34.^\circ$$

Perustuksen alapuolisen maan tehokas kitkakulma

$$c_t = 0 \text{ kPa}$$

Perustuksen alapuolisen maan tehokas koheesio

Kantavuuskertoimet

$$N_q := \tan\left(45^\circ + \frac{\phi_t}{2}\right) \cdot e^{\pi \tan(\phi_t)} = 29.44$$

$$N_c := (N_q - 1) \cdot \cot(\phi_t) = 42.16$$

$$N_\gamma := 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\phi_t) = 38.37$$

Kertoimet pohjan kaltevuudelle

$$b_q := (1 - \alpha \cdot \tan(\phi_t))^2 = 1$$

$$b_c := b_q - \frac{(1 - b_q)}{N_c \cdot \tan(\phi_t)} = 1$$

$$b_\gamma := b_q = 1$$

Kertoimet perustuksen tehollisten sivumittojen muodolle

$$s_q := 1 + \frac{B'}{L'} \cdot \sin(\phi_t) = 1.334$$

$$s_c := \frac{s_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1} = 1.345$$

$$s_\gamma := 1 - \frac{B'}{L'} \cdot 0.3 = 0.821$$

Kertoimet kuormitusresultantin kaltevuudelle

$$m_B := \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}} = 1.626$$

$$m_L := \frac{2 + \frac{L'}{B'}}{1 + \frac{L'}{B'}} = 1.374$$

$$\Theta := \begin{cases} (90.^\circ) & \text{if } H_{y,k} = 0 \\ \arctan\left(\frac{H_{x,k}}{H_{y,k}}\right) & \text{otherwise} \end{cases} = 90.^\circ$$

Kuorman vaakakomponentin muodostama kulma Θ L' :n suunnan kanssa

$$m_\Theta := m_L \cdot \cos(\Theta)^2 + m_B \cdot \sin(\Theta)^2 = 1.626$$

$$i_q := \left(1 - \frac{H_{\text{tot},k}}{V_k + A_t \cdot c_t \cdot \cot(\phi_t)} \right)^{m_\Theta} = 0.782 \quad i_\gamma := \left(1 - \frac{H_{\text{tot},k}}{V_k + A_t \cdot c_t \cdot \cot(\phi_t)} \right)^{m_\Theta+1} = 0.672$$

$$i_c := i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan(\phi_t)} = 0.774$$

4.3 KANTOKESTÄVYYDEN LASKENTA

Mitoitusehto: $R_d > V_d$

Kantokestävyyden mitoitusarvo

$$q_{Rd} := g_{\text{luiska}} \cdot \frac{c_t \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + D \cdot \gamma_{yp} \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma_{ap} \cdot B \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma}{\gamma_{R,v}} = 105.521 \cdot \text{kPa}$$

$$R_d := q_{Rd} \cdot A_t = 161.129 \cdot \text{kN} \quad \text{Pystykuormakestävyyden mitoitusarvo}$$

$$V_d = 160.5 \cdot \text{kN}$$

$$R_d > V_d = 1 \quad \text{Mitoitusehdon tarkistus (1=OK, 0= ei riitä)}$$

$$F_{\text{kant}} := \frac{R_d}{V_d} = 1.004 \quad \text{Kantokestävyyden ylämääräyskerroin}$$

4.4 LIUKUMISKESTÄVYYS

Mitoitusehto: $R_d > H_d$

$$V_{d,\text{liuk}} := \gamma_{G,\text{stb}} \cdot (F_{g,z} + G_{\text{per}} + G_{\text{maa}}) + \gamma_{Q,\text{stb}} \cdot F_{q,z} = 123.461 \cdot \text{kN} \quad \text{Pystykuorman laskena-arvo liukumiskestävyydlaskennassa (vain pysyvät kuormat huomioidaan)}$$

$$\delta_k := \frac{2}{3} \cdot \phi_t = 22.667^\circ$$

Maan ominaisleikkauskestävyysskulma,
 paikallavalurakenteella $\delta_k = \phi_t$
 elementtiperustuksella $\delta_k = 2/3 \phi_t$

$$R_{d,\text{liuku}} := \frac{V_{d,\text{liuk}} \cdot \tan(\delta_k)}{\gamma_{Rh}} = 46.873 \cdot \text{kN} \quad \text{Liukumiskestävyys}$$

$$H_{\text{tot},d} = 22.519 \cdot \text{kN}$$

$$R_{d,\text{liuku}} > H_{\text{tot},d} = 1 \quad \text{Mitoitusehdon tarkistus (1=OK, 0= ei riitä)}$$

$$F_{\text{liuk}} := \frac{R_{d,\text{liuku}}}{H_{\text{tot},d}} = 2.081 \quad \text{Liukumiskestävyyden ylämääräyskerroin}$$

5. PERUSTUKSEN KIERTYMÄT JA SIIRTYMÄT**5.1 POHJAMAAN JA PERUSTUKSEN OMINAISUUDET**

Maan kimmomoduuli lasketaan ohjeen kuvan 5.4 mukaisena painotettuna keskiarvona

$$\theta_1 := (1 + 2 \cdot K_0) \left(\gamma_{yp} \cdot D + \frac{0.75 B_x}{2} \cdot \gamma_{ap} \right) = 55.845 \cdot \text{kPa} \quad \text{Pääjännitysten summa painotuskerroksen 1 keskellä}$$

$$E_{s,1} := m_{penger} \cdot 100 \text{ kPa} \cdot \left(\frac{\theta_1}{100 \cdot \text{kPa}} \right)^{\beta_{penger}} = 22.419 \cdot \text{MPa} \quad \text{Painotuskerroksen 1 keskimääräinen kimmomoduuli}$$

$$\theta_2 := (1 + 2 \cdot K_0) \left(\gamma_{yp} \cdot D + 1.125 B_x \cdot \gamma_{ap} \right) = 101.427 \cdot \text{kPa} \quad \text{Pääjännitysten summa painotuskerroksen 2 keskellä}$$

$$E_{s,2} := m_{penger} \cdot 100 \text{ kPa} \cdot \left(\frac{\theta_2}{100 \cdot \text{kPa}} \right)^{\beta_{penger}} = 30.213 \cdot \text{MPa} \quad \text{Painotuskerroksen 2 keskimääräinen kimmomoduuli}$$

$$\theta_3 := (1 + 2 \cdot K_0) \left(\gamma_{yp} \cdot D + 1.75 B_x \cdot \gamma_{ap} \right) = 139.412 \cdot \text{kPa} \quad \text{Pääjännitysten summa painotuskerroksen 3 keskellä}$$

$$E_{s,3} := m_{penger} \cdot 100 \text{ kPa} \cdot \left(\frac{\theta_3}{100 \cdot \text{kPa}} \right)^{\beta_{penger}} = 35.422 \cdot \text{MPa} \quad \text{Painotuskerroksen 3 keskimääräinen kimmomoduuli}$$

$$E_s := \frac{1}{6} (3 \cdot E_{s,1} + 2 \cdot E_{s,2} + E_{s,3}) = 27.184 \cdot \text{MPa}$$

Pohjamaan painotettu kimmomoduuli

$$\nu = 0.2$$

Ratapengermateriaalin Poissonin luku

$$I_\theta := 3.98 \quad \text{Perustuksen muotokerroin (ohjeen taulukosta 5.2)} \quad \frac{B_x}{B_y} = 1.187$$

5.2 MOMENTIT PERUSTAMISTASOSSA

Pysyvien ja muuttuvien kuormien aiheuttama momentti perustamistasossa:

$$M_{GQk} := M_{g,y} + F_{g,x} \cdot H_{per} + M_{g,penger} + M_{g,tukik} + M_{g,luiska} + M_{g,maa} + M_{q,y} + F_{q,x} \cdot H_{per} = 58.4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Muuttuvien kuormien aiheuttama momentti perustamistasossa:

$$M_{Qk} := M_{q,y} + F_{q,x} \cdot H_{per} = 28.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Pysyvien kuormien aiheuttama momentti perustamistasossa:

$$M_{Gk} := M_{g,y} + F_{g,x} \cdot H_{per} + M_{g,penger} + M_{g,tukik} + M_{g,luiska} + M_{g,maa} = 29.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

5.3 PERUSTUKSEN KIERTYMÄT JA SIIRTYMÄT

Perustuksen kiertymät lasketaan suunnitteluohjeen yhtälöllä 5.1.

Muuttuvien kuormien aiheuttama kiertymä

$$\phi_Q := \frac{M_{Qk} (1 - \nu^2)}{B_x \cdot B_y^2 \cdot E_s} \cdot I_\theta = 0.832 \cdot \text{‰}$$

Pysyvien ja muuttuvien kuormien aiheuttama kiertymä

$$\phi_{GQ} := \frac{M_{GQk} (1 - \nu^2)}{B_x \cdot B_y^2 \cdot E_s} \cdot I_\theta = 1.687 \cdot \text{‰}$$

Muuttuvien kuormien aiheuttama vaakasiirtymä peruspilarin yläpäässä

$$\Delta_Q := \phi_Q \cdot H_{per} = 2.289 \cdot \text{mm}$$

Pysyvien ja muuttuvien kuormien aiheuttama vaakasiirtymä peruspilarin yläpäässä

$$\Delta_{GQ} := \phi_{GQ} \cdot H_{per} = 4.639 \cdot \text{mm}$$

6. YHTEENVETO

Mitoitusehtojen tarkistus, yhteenveto

Kuorman epäkeskisyyys:

$$e_x < \frac{B_x}{3} = 1 \quad \text{Epäkeskisyyys x-suunnassa (rataa vastaan kohtisuorasuunta)}$$

$$e_y < \frac{B_y}{3} = 1 \quad \text{Epäkeskisyyys y-suunnassa (radan suunta)}$$

Kantokestävyys:

$$R_d > V_d = 1$$

Liukumiskestävyys:

$$R_{d,liuku} > H_{tot,d} = 1$$

Kiertymät ja siirtymät

$$\phi_Q < 3 \cdot \% = 1 \quad \text{Muuttuvien kuormien aiheuttama perustuksen kiertymä}$$

$$\phi_{GQ} < 4 \cdot \% = 1 \quad \text{Pysyvien ja muuttuvien kuormien aiheuttama perustuksen kiertymä}$$

$$\Delta_Q < 10 \cdot \text{mm} = 1 \quad \text{Muuttuvien kuormien aiheuttama vaakasiirtymä perustuksen yläpäässä}$$

$$\Delta_{GQ} < 15 \cdot \text{mm} = 1 \quad \text{Muuttuvien kuormien aiheuttama vaakasiirtymä perustuksen yläpäässä}$$

Lopulliset anturan mitat:

$B_x = 1.9 \text{ m}$	Anturan pituus (sivumitta kohtisuoraan rataa vasten)
$B_y = 1.6 \text{ m}$	Anturan leveys (sivumitta radan suunnassa)
$b_x = 0.65 \text{ m}$	Peruspilarin pituus (sivumitta kohtisuoraan rataa vasten)
$b_y = 0.45 \text{ m}$	Peruspilarin leveys (sivumitta radan suunnassa)
$H_{per} = 2.75 \text{ m}$	Perustuksen korkeus
$H_{ant} = 0.3 \text{ m}$	Anturan korkeus
$D = 1.033 \text{ m}$	Perustustamissyvyys (anturan etureunasta kohtisuoraan ylöspäin luiskun pintaan)

Meluseinä koostuu kahdesta 1,2 m korkeasta ontelolaattaelementistä, joiden pintaan asennetaan puuverhous. Seinän korkeutta on nostettu verhouksella 0,1 m, joten seinän kokonaiskorkeus on 2,5 m. Seinän jännemitta l on 6,0 m. Seinän runkotolppina on IPE200-teräsprofiilit.

1.3 Pohjaolosuhteet

Pohjamaa on alueella keskitiivistä silttiä, jonka alta noin 2 m syvyydeltä alkaa tiivis hiekkakerros. Rakennettavan penkereen materiaali on löyhää hiekkaa. Pohjamaan ja penkereen lujuus- ja muodonmuutosparametrit on esitetty taulukossa 1. Pohjaveden pinta sijaitsee ojan pohjan tasossa. Pohjatutkimusten perusteella penkereen ja pohjamaan materiaali on kivetöntä, joten avonaisten putkipaalujen käyttö on mahdollista perustamisessa.

Taulukko 1. Penkereen ja pohjamaan lujuus- ja muodonmuutosparametrit.

Korkeus- taso		Maalaji	Tilavuuspaino [kN/m ³] pohjavesi- pinnan		Leikkaus- kestävyys- kulma [°]	Muodonmuutos- parametrit		
			Yläpuo- lolla	Alapuo- lolla		m	β	ν
+1,5...0	Penger	Löyhä Hk	17	9	33	200	0,5	0,2
0...-2	Pohja- maa	Keskitiivis kaSi	17	9	30	100	0,3	0,3
-2...	Pohja- maa	Tiivis Hk	18	10	36	400	0,5	0,2

1.4 Mitoituksen raja-arvot

Meluesteiden siirtymien raja-arvot on kerrottu Liikenneviraston ohjeessa *Tien meluesteiden suunnittelu*. Sallittu kokonaissiirtymä on maanteiden meluesteiden pilarin yläpäässä L/60, kuitenkin enintään 75 mm. Siirtymä koostuu paalun sivusiirtymästä, paalun yläpään kiertymästä ja meluesteen runkotolpan painumasta.

Meluesteen korkeuden ollessa L=2500 mm, on meluesteen yläpään siirtymän raja-arvo $e < 2500/60 = 42$ mm.

2 Kuormat

Meluesteeseen kohdistuvat kuormitukset määritetään Liikenneviraston ohjeen *Tien melusteiden suunnittelu* mukaan.

2.1 Omapaino

Laattaelementtien omapaino on arviolta 2,5 kN/m². Puuverhouksen paino on arviolta 0,5 kN/m². Elementin omapaino on:

$$G_k = (2,5 \text{ kN/m}^2 + 0,5 \text{ kN/m}^2) \times 2,5 \text{ m} = 7,5 \text{ kN/m}$$

2.2 Lumikuorma

Lumikuorman ominaisarvo on meluseinän alueella 2,0 kN/m². Seinän arvioitu leveys yläosassa on 0,25 m. Lumikuorma on:

$$Q_{k,\text{lumi}} = 2,0 \text{ kN/m}^2 \times 0,25 \text{ m} = 0,5 \text{ kN/m}$$

2.3 Tuulikuorma

Meluste sijaitsee maastoluokan I alueella. Esteen korkeus on 2,5 m ja penkereen korkeus on 1,5 m. Melustehyönteeseen mukaan tällaiselle rakenteelle voidaan käyttää tuulenpaineen ominaisarvona:

$$Q_{k,\text{tuuli}} = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

2.4 Aurauslumikuorma

Aurausajoneuvon nopeus 60 km/h. Seinän etäisyys tien reunasta on 5,3 m. Ohjeen *Tien melusteiden suunnittelu* kuvan 43 mukaan aurauslumikuorman ominaisarvon suuruus on 12 kN 5,3 m etäisyydellä aurattavan alueen reunasta. Aurauslumikuorma jakautuu tasan 2 m x 2 m alalle, jonka korkeus tien pinnasta on korkeintaan 2,5 m. Aurauslumikuorman suuruus seinälle kohdistettuna:

$$Q_{k,\text{auraus}} = 12 \text{ kN} / (2,0 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}) = 3,0 \text{ kN/m}^2$$

Seinän alareuna on 1,0 m korkeudella tien pinnasta, joten aurauslumikuorma kohdistuu 1,5 m korkeudelle seinän alareunasta. Aurauslumikuorman leveys on 2,0 m. Perustuksen mitoituksessa aurauslumikuorman epäedullisin sijainti on perustuksen kohdalla.

Aurauskuormaa sovelletaan vain murtorajatilatarkastelussa eikä se esiinny samaan aikaan tuulikuorman kanssa.

2.5 Muut kuormat

Ajoneuvon törmäyskuormaa ei huomioida perustuksen mitoituksessa. Meluaste sijaitsee 5,3 m etäisyydellä tien reunasta, joten ajoneuvojen paine- ja imukuormia ei tarvitse huomioida. Negatiivista vaippahankausta ei oleteta syntyvän vallitsevissa pohjaolosuhteissa.

2.6 Kuormien yhdistely

Kuormien osavarmuuslukuina käytetään NCCI1:ssä esitettyjä osavarmuuslukuja. Mitoittavat kuormitustapaukset ovat:

- omapaino + lumikuorma + tuulikuorma
- omapaino + lumikuorma + auraslumikuorma

Omapaino ja lumikuorma ovat pystysuuntaisia kuormia. Tuulikuorma ja auraslumikuorma vaikuttavat seinään vaakasuunnassa.

Yhdelle perustukselle kohdistuvat kuormitukset perustuksen ja seinän liitoskohtaan laskettuna. Seinän jännemitta $l = 6,0$ m.

Pystysuuntaiset kuormat:

$$V_k = G_k + Q_{k,lumi}$$

$$V_d = K_{FI} \times (\gamma_G \times G_k + \gamma_Q \times Q_k)$$

$$V_k = (7,5 \text{ kN/m} + 0,5 \text{ kN/m}) \times 6,0 \text{ m} = 48 \text{ kN}$$

$$V_d = 1,0 \times 1,35 \times 7,5 \text{ kN/m} \times 6,0 \text{ m} = \mathbf{60,8 \text{ kN}}$$
 (yhtälö 6.10a)

$$V_d = 1,0 \times (1,15 \times 7,5 \text{ kN/m} + 1,5 \times 0,5 \text{ kN/m}) \times 6,0 \text{ m} = 56,3 \text{ kN}$$
 (yhtälö 6.10b)

Vaakasuuntaiset kuormat:

Vaakasuuntaisia kuormia on vain tuulikuorma ja auraskuorma, jotka ovat muuttuvia kuormia.

Tuulikuorma:

$$H_{k1} = Q_{k,tuuli}$$

$$H_{d1} = K_{FI} \times \gamma_Q \times Q_{k,tuuli}$$

$$H_{k1} = 0,8 \text{ kN/m}^2 \times 2,5 \text{ m} \times 6,0 \text{ m} = \mathbf{12 \text{ kN}}$$

$$H_{d1} = 1,0 \times 1,5 \times 0,8 \text{ kN/m}^2 \times 2,5 \text{ m} \times 6,0 \text{ m} = \mathbf{18 \text{ kN}}$$

Tuulikuorman aiheuttama momentti perustuksen yläpäässä:

$$M_{k1} = 12 \text{ kN} \times 1,25 \text{ m} = \mathbf{15 \text{ kNm}}$$

$$M_{d1} = 18 \text{ kN} \times 1,25 \text{ m} = \mathbf{22,5 \text{ kNm}}$$

Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje

Aurauslumikuorma:

$$H_{d2} = K_{FI} \times \gamma_Q \times Q_{k, \text{auraus}}$$

$$H_{d2} = 1,0 \times 1,5 \times 3,0 \text{ kN/m}^2 \times 1,5 \text{ m} \times 2,0 \text{ m} = 13,5 \text{ kN}$$

Aurauslumikuorman aiheuttama momentti perustuksen yläpäässä

$$M_{d2} = 13,5 \text{ kN} \times 0,75 \text{ m} = 10,1 \text{ kNm}$$

Tuulikuorma ja aurauslumikuorma eivät esiinny samaan aikaan, joten tuulikuorma muodostuu määrääväksi kuormitukseksi.

3 Paaluperustuksen geotekninen mitoitus

3.1 Perustuksen tiedot

Paaluperustuksina käytetään lyötäviä maakärjellä varustettuja teräsputkipaaluja. Perustus sijaitsee alle 10 metrin etäisyydellä kunnossapitoluokan 1 tien ajoradan reunasta. Korroosion aiheuttama seinämävahvuuden menetys on 50 vuoden käyttöiällä 2,0 mm putken ulkopuolella ja sisäpuolella 0,40 mm (yläpäästä suljettu ja alapäässä maakärki).

Alustavasti paaluna käytetään 220/10 (d=219,1 mm, t=10 mm) teräsputkipaaluja. Korroosion aiheuttaman seinämävahvuuden menetyksen jälkeen paalun ulkomitta on d=217,1 mm ja seinämävahvuus t=7,6 mm.

3.2 Mitoitus pystysuuntaiselle kuormitukselle

Paalun pystysuuntainen kestävyys mitoitetaan ohjeen Paalutusohje 2016 mukaan. Mitoitus tehdään pohjatutkimuksiin perustuvalla menetelmällä. Paalu mitoitetaan kitkapaaluna.

Paalun geotekninen puristuskestävyys lasketaan kärkikestävyiden ja vaippakitkan yhteisarvona.

Geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo: $R_{c,d} = R_{b,d} + R_{s,d}$

$$R_{b,d} = R_{b,k} / (\gamma_b \cdot \gamma_M) \quad R_{s,d} = R_{s,k} / (\gamma_s \cdot \gamma_M)$$

kärki- ja vaippakestävyiden osavarmuusluvut $\gamma_b = \gamma_s = 1,2$
 γ_M on mallikerroin (kitkapaalulla vähintään 1,60).

Paalun geotekninen puristuskestävyys eri kärjen tasolla on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kitkapaalun geotekninen puristuskestävyys.

Maa- kerros	z [m]	σ_v' [kPa]	N_q	$K_s \tan \phi_a$	Kärkikestävyys		Vaippakestävyys		Puristuskestävyys	
					$q_{b,k}$ [kN/m ²]	$R_{b,k}$ [kN]	$q_{s,i}$ [kN/m ²]	$R_{s,k}$ [kN]	$R_{c,k}$ [kN]	$R_{c,d}$ [kN]
Löyhä Hk, $\phi=33^\circ$	0,0	0,0	55	0,27	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
	-0,5	8,5	55	0,27	468	17,3	2,3	0,4	17,7	9,2
	-1,0	17,0	55	0,27	935	34,6	4,6	1,6	36,2	18,8
	-1,5	25,5	55	0,27	1403	51,9	6,9	3,5	55,4	28,9
Keskitiivis kaSi, $\phi=30^\circ$	-1,5	25,5	35	0,19	893	33,0	4,8	3,5	36,5	19,0
	-2,0	30,5	35	0,19	1068	39,5	5,8	5,3	44,8	23,4
	-2,5	35,5	35	0,19	1243	46,0	6,7	7,5	53,4	27,8
	-3,0	40,5	35	0,19	1418	52,4	7,7	9,9	62,4	32,5
	-3,5	45,5	35	0,19	1593	58,9	8,6	12,7	71,6	37,3
Tiivis Hk, $\phi=36^\circ$	-3,5	45,5	85	0,44	3868	143,1	20,0	12,7	155,8	81,2
	-4,0	51,0	85	0,44	4335	160,4	22,4	18,0	178,4	92,9
	-4,5	56,5	85	0,44	4803	177,7	24,9	24,1	201,8	105,1
	-5,0	62,0	85	0,44	5270	195,0	27,3	31,1	226,1	117,8

Pystykuorman mitoitusarvo $F_{c;d} = 60,8 \text{ kN}$.

Mitoitusehto: $F_{c;d} \leq R_{c;d}$

Vaadittava paalun upotussyvyys pystysuuntaisen kuormituksen perusteella on 4,0 m. Puristuskestävyyden mitoitusarvo on tällöin $R_{c;d} = 92,9 \text{ kN}$.

3.3 Mitoitus vaakasuuntaiselle kuormitukselle

3.3.1 Sivukuormituskestävyyden rakennemalli

Sivukuormitusmitoituksessa paalun ympärillä olevaa maata ja sen käyttäytymistä kuvataan jousilla, joiden jäykkyys riippuu paalun siirtymästä. Paalun pituus on 4,0 m. Jousien väli mallissa on 0,5 m.

Jouset ovat epälineaarisesti käyttäytyviä jousia, ja niiden jäykkyyden määrittää alustaluku ohjeen kuvan 7.6 mukaisesti. Rakennemallina käytetään mallia, jossa paalun kiertokeskiö voi syntyä vapaasti kuormituksen ja jousien käyttäytymisen yhteisvaikutuksesta (paalun alapäässä ei ole esimerkiksi niveltukea).

3.3.2 Alustaluvut ja sivuvastus

Alustalukujen määrittäminen NCCI7:n mukaisesti.

Alustaluku k_s :
$$k_s = n_h \cdot \frac{z}{d}$$

Alustalukukerroin n_h :
$$n_h = 0,74 \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \cdot \frac{M_s}{z}$$

Kokoonpuristuvuusmoduuli M_s :
$$M_s = 100 \cdot m \cdot \left(\frac{\sigma'_v}{100} \right)^{1-\beta}$$

Alustaluvut kasvavat maakerroksessa syvyyteen 10d asti ja pysyvät sen jälkeen vakiona.

Sivuvastuksen ääriarvo lasketaan ohjeen kuvan 7.4 mukaisesti.

Sivuvastuksen ääriarvo p_m :
$$p_m = 3 \cdot \gamma' \cdot z \cdot K_p$$

Passiivipainekerroin määritetään eurokoodin nomogrammeista käyttäen paalun ja maan välisen leikkauskestävyysskulman arvona 50 % maan leikkauskestävyysskulmasta (maan ja teräksen välinen kontakti). Käytettävät passiivipainekertoimet on esitetty taulukossa 3.

Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje

Taulukko 3. Alustaluvut, sivuvastuksen ääriarvot ja niitä vastaavat rajasiirtymät maakerroksittain

Maakerros	Leikkauskestävyyskulma	Passiivipainekerroin K_p
Löyhä Hk	33	5,2
Keskittiivis kaSi	30	4,3
Tiivis Hk	36	6,3

Käyttörajatilamitoituksessa luiskan vaikutus paalun sivuvastukseen otetaan huomioon luiskakertoimella ohjeen kuvan 7.5 mukaisesti. Sivuvastuksen ääriarvoa pienennetään taulukon 7.1 mukaisesti kertoimella $g=0,42$ syvyydelle, jolle vaakasuora etäisyys paalun ulkopinnasta luiskan pintaan on pienempi kuin $4 \times$ paalun halkaisija. Jousia redusoidaan syvyydelle $4 \times 217 \text{ mm} \times (1:2) = 434 \text{ mm}$ saakka. Koska jousivälinä käytetään 0,5 m, käytetään ylimmän 0,5 m jousen arvona luiskakertoimella pienennettyä jousiarvoa. Syvyyden 0,5 m alapuolella jousien arvoja ei käyttörajatilamitoituksessa redusoida.

Murtorajatilamitoituksessa luiskan vaikutus paalun sivuvastukseen otetaan huomioon luiskan juuresta paalun kylkeen ulottuvan passiiviliukupinnan yläpuolisella osalla.

Tasaiselle maalle lasketut alustaluvut, sivuvastuksen ääriarvot ja niitä vastaavat rajasiirtymät on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Alustaluvut, sivuvastuksen ääriarvot ja niitä vastaavat rajasiirtymät maakerroksittain

Maa- kerros	z [m]	σ_v [kPa]	M_s [kN/m ²]	n_h [kN/m ³]	Alustaluku		Sivuvastuksen ääriarvo			Rajasiirtymä	
					k_s [kN/m ³]	$1/3 \cdot k_s$ [kN/m ³]	K_p	p_m [kN/m ²]	$p_m/2$ [kN/m ²]	y_m [m]	$y_m/4$ [m]
Löyhä Hk	0	0,00	0	0	0	0	5,2	0	0	0,0000	0,0000
	-0,25	4,25	4123	10984	12654	4218	5,2	66	33	0,0105	0,0026
	-0,5	8,50	5831	7767	17896	5965	5,2	133	66	0,0148	0,0037
	-0,75	12,75	7141	6342	21918	7306	5,2	199	99	0,0181	0,0045
	-1	17,00	8246	5492	25309	8436	5,2	265	133	0,0210	0,0052
	-1,25	21,25	9220	4912	28296	9432	5,2	332	166	0,0234	0,0059
	-1,500	25,50	10100	4484	30997	10332	5,2	398	199	0,0257	0,0064
Keskittiivis kaSi	-1,500	25,50	3842	1408	9733	3244	4,3	329	164	0,0676	0,0169
	-1,75	28,00	4102	1289	10392	3464	4,3	361	181	0,0695	0,0174
	-2	30,50	4355	1197	11033	3678	4,3	393	197	0,0713	0,0178
	-2,25	33,00	4602	1124	11658	3886	4,3	426	213	0,0730	0,0183
	-2,500	35,50	4844	1065	12270	4090	4,3	458	229	0,0746	0,0187
	-2,75	38,00	5080	1015	12868	4289	4,3	490	245	0,0762	0,0190
	-3	40,50	5312	973	13455	4485	4,3	522	261	0,0777	0,0194
	-3,25	43,00	5539	937	14032	4677	4,3	555	277	0,0791	0,0198
Tiivis Hk	-3,5	45,50	5762	905	14598	4866	4,3	587	293	0,0804	0,0201
	-3,5	45,50	20236	3851	62107	20702	6,3	860	430	0,0277	0,0069
	-3,75	48,25	20839	3701	63956	21319	6,3	912	456	0,0285	0,0071
	-4	51,00	21424	3567	65754	21918	6,3	964	482	0,0293	0,0073
	-4,25	53,75	21994	3447	67503	22501	6,3	1016	508	0,0301	0,0075
	-4,5	56,50	22550	3337	69209	23070	6,3	1068	534	0,0309	0,0077
	-4,75	59,25	23092	3238	70873	23624	6,3	1120	560	0,0316	0,0079
	-5	62,00	23622	3146	72499	24166	6,3	1172	586	0,0323	0,0081

3.3.3 Rakennemallin maajouset

Rakennemallissa käytettävät jouset sijoitetaan jousivälin keskipisteeseen. Laskennassa käytetään laskentaohjelmaa (Autodesk Robot), joka mahdollistaa epälineaaristen jousien käytön, jolloin laskenta voidaan tehdä yhdellä kertaa. Jousi käyttäytyy epälineaarisesti molempiin siirtymäsuuntiin. Paaluun syntyy kiertokeskiö kuormituksen ja jousien käyttäytymisen yhteisvaikutuksen seurauksena.

Jousen tukivoiman ääriarvo: $F_{max,z} = p_{m,z} \cdot d_{paalu} \cdot e_{jousi} \cdot g_{luiska}$

Käyttörajatilamitoitus

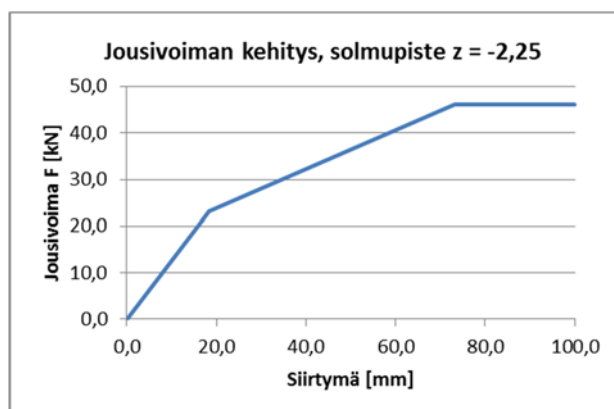
Jousivoiman kulmakertoimen muutoskohtia (F_{max} ja $F_{max}/2$) vastaavat siirtymäarvot (y_m ja $y_m/4$) saadaan taulukon 3 jousen solmupisteen syvyyttä vastaavista rajasiirtymistä.

Laskentamallissa käytettävät jousiarvot on esitetty taulukossa 5. Laskennassa paalun pituus on pystysuuntaisen kestävyuden perusteella määritetty 4,0 m.

Taulukko 5. Käyttörajatilassa rakennemallissa käytettävien jousitukien parametrit.

z	e_{jousi}	d_{paalu}	g_{luiska}	F_{max}	$F_{max}/2$	y_m	$y_m/4$
[m]	[m]	[m]		[kN]	[kN]	[mm]	[mm]
-0,25	0,5	0,217	0,42	3,0	1,5	10,5	2,6
-0,75	0,5	0,217	1	21,6	10,8	18,1	4,5
-1,25	0,5	0,217	1	36,0	18,0	23,4	5,9
-1,75	0,5	0,217	1	39,2	19,6	69,5	17,4
-2,250	0,5	0,217	1	46,2	23,1	73,0	18,3
-2,750	0,5	0,217	1	53,2	26,6	76,2	19,0
-3,250	0,5	0,217	1	60,2	30,1	79,1	19,8
-3,750	0,5	0,217	1	98,9	49,5	28,5	7,1

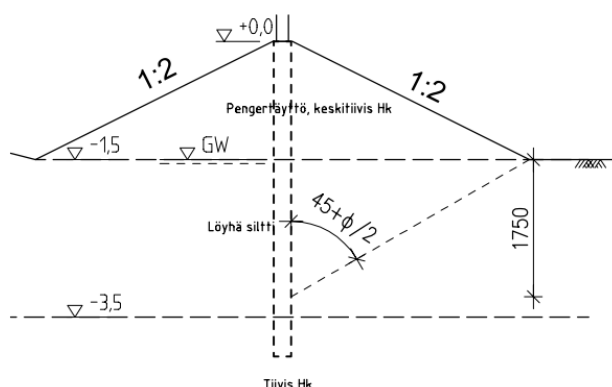
Esimerkiksi syvyysväliä -2...-2,5 kuvaavalle jouselle (solmupisteen z-koordinaatti -2,25) saadaan laskentaohjelmaan kuvan 2 mukainen siirtymän mukaan kehittyvä epälineaarinen jousi.



Kuva 2. Esimerkki rakennemallissa käytetyn jousituen käyttäytymisestä.

Murtorajatilamitoitus

Murtorajatilassa luiskan vaikutus paalun sivuvastukseen otetaan huomioon luiskan juuresta paalun kylkeen ulottuvan passiiviliukupinnan yläpuolisella osalla. Pohjamaan leikkauskestävyyskulma on luiskan alapuolella 30° . Luiskan juuresta lähtevä passiiviliukupinta osuu paalun kylkeen 1,75 m syvyydellä luiskan alareunasta (kuva 3). Murtorajatilatarkastelussa luiskakerrointa käytetään siis tason -3,25 yläpuolella.



Kuva 3. Esimerkki rakennemallissa käytetyn jousituen käyttäytymisestä.

Sivuvastuksen ääriarvoa pienennetään maan kestävyiden osavarmuusluvulla $\gamma_{Re} = 1,5$, jolloin saadaan maan kestävyiden murtorajatilamitoitusarvo. Jousifunktiot määritetään ohjeen kuvien 7.1 ja 7.6 mukaisesti. Osavarmuusluvulla $\gamma_{Re} = 1,5$ murtorajatilamitoitusarvoa vastaavaksi rajasiirtymäksi muodostuu puolet käyttörajatilamitoitusarvosta y_m . Murtorajatilamitoituksessa käytettävien jousitukien parametrit on esitetty taulukossa 6.

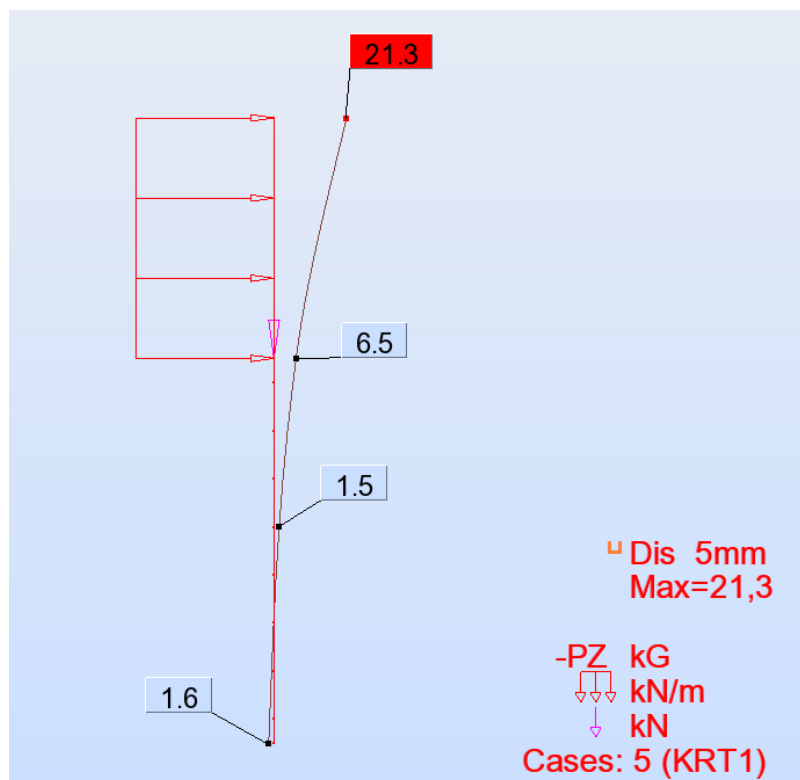
Murtorajatilamitoituksen tekeminen alustalukumenetelmällä mahdollistaa maan ominaisuuksien ja kuormituksen kannalta heikoimman kiertokeskiön sijainnin löytymisen. Käsinsäätömenetelmällä maan kestävyys kannalta heikoin kiertokeskiön sijainti pitäisi etsiä kokeilemalla.

Taulukko 6. Murtorajatilan rakennemallissa käytettävien jousitukien parametrit.

z	e _{jousi}	d _{paalu}	g _{luiska}	F _{max}	F _{max} /Y _{Re}	F _{max} /2	y _m	y _m /2	y _m /4
[m]	[m]	[m]		[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]
-0,25	0,5	0,217	0,42	3,0	2,0	1,5	10,5	5,2	2,6
-0,75	0,5	0,217	0,42	9,1	6,0	4,5	18,1	9,1	2,3
-1,25	0,5	0,217	0,42	15,1	10,1	7,6	23,4	11,7	2,9
-1,75	0,5	0,217	0,42	16,5	11,0	8,2	69,5	34,8	8,7
-2,250	0,5	0,217	0,42	19,4	12,9	9,7	73,0	36,5	9,1
-2,750	0,5	0,217	0,42	22,3	14,9	11,2	76,2	38,1	9,5
-3,250	0,5	0,217	0,42	25,3	16,9	12,6	79,1	39,5	9,9
-3,750	0,5	0,217	1	98,9	66,0	49,5	28,5	14,3	3,6

3.3.4 Käyttörajatilamitoitus

Meluesteen ja perustuksen sivusiirtymien laskenta tehdään laskentaohjelmalla. Paalu on mallinnettu korroosion aiheuttamat seinämänvahvuudenmenetykset huomioiden. Meluesteen runkopilari on mallinnettu todellisena poikkileikkauksena, jolloin runkopilarin taipuma tulee huomioitua. Meluesteen ja paaluperustuksen laskennalliset sivusiirtymät on esitetty kuvassa 4. Kuormitustapauksena on mitoittavammaksi muodostunut tuulikuorman ominaisarvo.



Kuva 4. Meluesteen runkopilarin ja perustuksen laskennalliset siirtymät.

Vaakasuuntainen siirtymä meluesteen yläreunassa on 21,3 mm. Suurin sallittu siirtymä on 42 mm, joten sivuttaissuuntaiset siirtymät ovat raja-arvon alapuolella.

3.3.5 Murtorajatilamitoitus

Murtorajatilamitoitus tehdään käyttäen jousitukien jousivoimien ääriarvoina maan kestävyys osavarmuusluvulla jaettua jousen ääriarvoa. Kuormituksena on tuulikuorman mitoitusarvo. Murtorajatilan mitoituskuormaa vastaavat jousien tukivoimat on esitetty kuvassa 5. Koska laskenta meni laskentaohjelmassa läpi, on maan kestävyys riittävä murtoa vastaan.

Tuulikuorman vaakasuuntaisen komponentin mitoitusarvo on $F_{x,d} = 18$ kN. Laskemalla yhteen kuorman vaakakomponentti kuvan 5 jousivoimat, saadaan tulokseksi nolla eli systeemi on tasapainossa.

Node/Case	FX (kN)
2/ 6	-2,00
3/ 6	-6,00
4/ 6	-10,10
5/ 6	-8,78
6/ 6	-9,76
7/ 6	-6,48
8/ 6	-2,14
9/ 6	27,26

Kuva 5. Murtorajatilamitoituksen mitoituskuormaa vastaavat jousivoimat.

3.3.6 Geoteknisen mitoituksen yhteenveto

Paalun upotussyvyys määräytyi paalun pystysuuntaisen kantokestävyyden perusteella. Paalun upotussyvyys on vähintään 4,0 m.

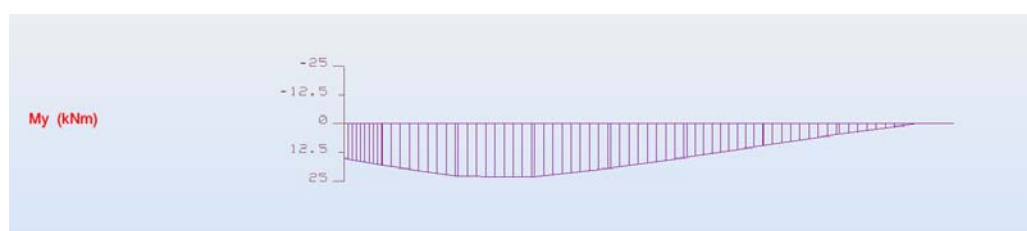
Paalun sivukuormituskestävyys on riittävä sekä käyttörajatilassa että murtorajatilassa.

4 Paalun rakenteellinen mitoitus

Paalun aksiaalisen kuormituksen mitoitusarvo on $N_d = 60,8$ kN.

Paaluperustuksen taivutusmomentin mitoitusarvo määritetään DA2*-menetelmällä. Paalun taivutusmomentin ominaisarvo saadaan käyttörajatilamitoituksen rakennemallista. DA2*-menetelmässä kuorman osavarmuudet kohdistetaan kuorman vaikutuksiin. Taivutusmomenttia aiheuttavaa kuormitusta on ainoastaan tuulikuorma, joka on muuttuvaa kuormaa.

Taivutusmomentin ääriarvo on $M_{k,max} = 23,1$ kNm (kuva 6).

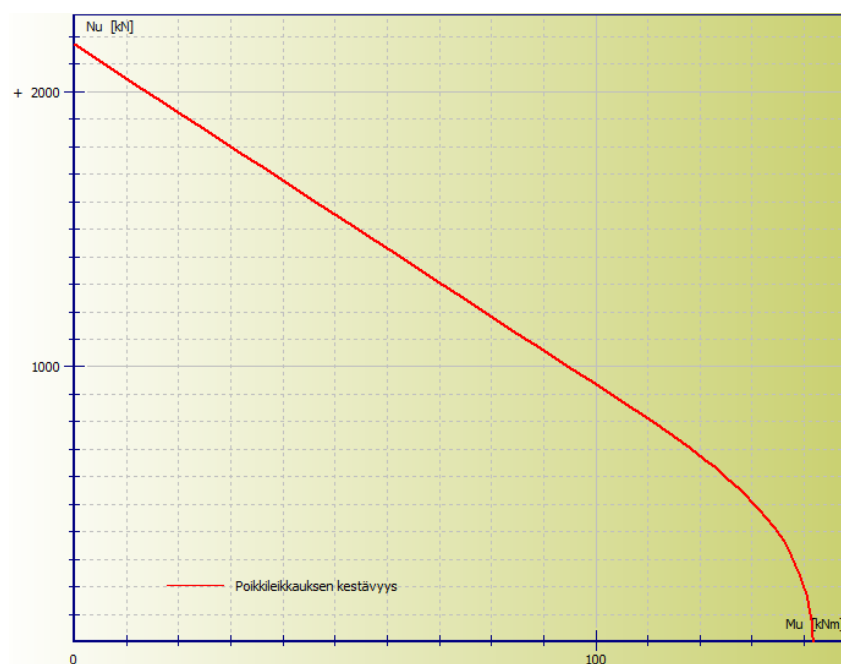


Kuva 6. Paalun taivutusmomentin ominaisarvo.

Taivutusmomentin mitoitusarvo:

$$M_d = M_k \cdot \gamma_Q = 23,1 \text{ kNm} \cdot 1,5 = 34,7 \text{ kNm}$$

220/10-putkipaalun kestävyys mitoitusarvo korroosion aiheuttama seinämänvahvuuden menetys huomioituna on esitetty kuvassa 7. Taivutusmomentin mitoitusarvoa 34,7 kNm vastaava puristuskestävyys on noin 1750 kN ($> 60,8$ kN), joten paalun rakenteellinen kestävyys on riittävä.



Kuva 7. 220/10 (S440) teräsputkipaalun kestävyys, kun paalua kuormittaa aksiaalinen voima ja taivutusmomentti.

ISSN-L 1798-663X
ISSN 1798-6648
ISBN 978-952-317-334-7
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto

Tämä asiakirja on allekirjoitettu

Lista allekirjoittajista

Allekirjoittaja

Todennus